

dc_779_13

Optoelektronikai eszközök és rendszerek

MTA doktori értekezés

Dr. Jakab László

2013

Tartalom

Bevezetés	3
1. A kutatások előzményei	
1.1 Az akusztó-optikai kölcsönhatás	4
1.2 Az akusztó-optikai eszközök előállítási technológiája	12
1.2.1 Kristálynövesztés és megmunkálás	12
1.2.2 Szélessávú ultrahangkeltő tervezése és készítése	14
1.3 Akusztó-optikai eszközök, modulátorok, eltérítők, frekvencia átalakítók, hangolható optikai szűrők	16
1.4 Akusztó-optikai mérő rendszerek, RF spektrum analízátorok, RF iránymérők	18
1.5 Akusztó-optikai elvű „true-time” késleltető vonal	21
1.6 Higanymentes DBD (dielectric barrier discharge) fluoreszcens lámpa	24
1.7 Automatikus optikai vizsgáló berendezések az elektronikai gyártásban	28
2. A kutatások célkitűzései	33
3. Új tudományos eredmények	
3.1. Akusztó-optikai Q-kapcsoló	35
3.2. Monoblokk, 2D infravörös akusztó-optikai fényeltérítő	38
3.3. RF iránymérő berendezés	41
3.4. „True-time” akusztó-optikai késleltető vonal	45
3.5. DBD (dielectric barrier discharge) fluoreszcens fényforrás	49
3.6. Automatikus optikai vizsgáló berendezések	
3.6.1. Új, kísérleti vizsgálóberendezések gyártósori alkalmazásokra	55
3.6.2. Automatikus vizsgáló algoritmusok fejlesztése virtuális alkatrész modellek segítségével	64
4. Tézisek	67
5. Az eredmények hasznosulása	69
6. Köszönetnyilvánítás	72
7. Műszaki alkotások	73
8. Irodalom	77

Bevezetés

„Optoelektronikai eszközök és rendszerek” című értekezésemben az 1992 és 2013 közötti periódusban elért kutatási eredményeimet foglalom össze. A munka 2006-ig a BME Természettudományi Kar Fizikai Intézet Atomfizika Tanszékének Optikai Laboratóriumában, 2006-tól a Villamosmérnöki és Informatikai Kar Elektronikai Technológia Tanszékén folyt. Ennek megfelelően, a kutatási területeim, amelyek eredetileg az akusztó-optikai jelenség vizsgálata és alkalmazásai köré csoportosíthatóak, bővültek fényforráskutatásokkal, illetve elektronikai gyártást támogató gyors és megbízható optikai vizsgálati módszerekkel.

Ha néhány szóval szeretném kiemelni a munka és az eredmények jellegét, akkor azt írhatnám, hogy azok szinte kizárólag az alkalmazott optika, idegen kifejezéssel „applied optics”, azon belül az „optical engineering” területére esnek.

Meglehet, a cím túl általános. Indokolt tehát az értekezés területének a pontosabb meghatározása. A következő táblázatban foglaltam össze, hogy az egyes eredmények hogyan kapcsolhatók az optika illetve az elektronika területeihez.

Kutatási területek	Elektronikai alkalmazások	Optikai alkalmazások	Együttes alkalmazás
Infravörös akusztó-optikai Q - kapcsoló		Impulzusüzemű lézerrendszerek	
Infravörös 2D akusztó-optikai fényeltérítő		Pásztázó lézer radar rendszerek	
RF akusztó-optikai iránymérő berendezés	Rádiófrekvenciás spektrum és fázis analízis		
Akusztó-optikai „true-time” késleltető vonal	Fázisvezérelt radar rendszerek		
Dielectric-barrier kisülések			Fényforrások
Automatikus optikai vizsgáló rendszerek	Elektronikai gyártás és szerelés technológia		

Az értekezés első fejezetében foglalom össze a munka előzményeit, ismertetem a kapcsolódó nemzetközi környezetet, az ismert eredményeket és kutatási irányokat. A második részben röviden összefoglalom a célkitűzéseket. A harmadik fejezetben részletesen mutatom be egy-egy különálló részben az elért tudományos eredményeket, amelyeknek tézisszerű megfogalmazását is megadom minden rész végén.

Ezután a tézisek összefoglalása illetve az eredmények hasznosulásának bemutatása következik. Egy külön fejezetben térek ki, hogy az elért eredmények milyen műszaki alkotások megvalósítását tették lehetővé, megjelölve a kapcsolódó publikációkat, szabadalmakat illetve hivatkozásokat.

Az irodalomjegyzékben külön csoportosítottam a tézisekhez köthető tíz legfontosabb publikációt (8.1 rész), a tézisekhez kapcsolódó egyéb saját cikkeket (8.2 rész), az értekezésben hivatkozott saját publikációkat (8.3 rész), illetve az összes hivatkozott nem saját irodalmat (8.4 rész).

1. A kutatások előzményei

1.1. Az akusztó-optikai kölcsönhatás

Az akusztó-optikai eszközök, mint aktív optikai elemek kutatása-fejlesztése a lézerek elterjedésével a 60-as évek végén vett lendületet. A kölcsönhatás fényelhajlás (diffrakció) akusztikus hullám által létrehozott periodikus törésmutató változáson, optikai rácson.

Ha akusztikus hullám terjed valamilyen közegben, a fotorugalmassági effektus következtében megváltozik a közeg törésmutatója [3.1]. Kis változásokra felírható, hogy

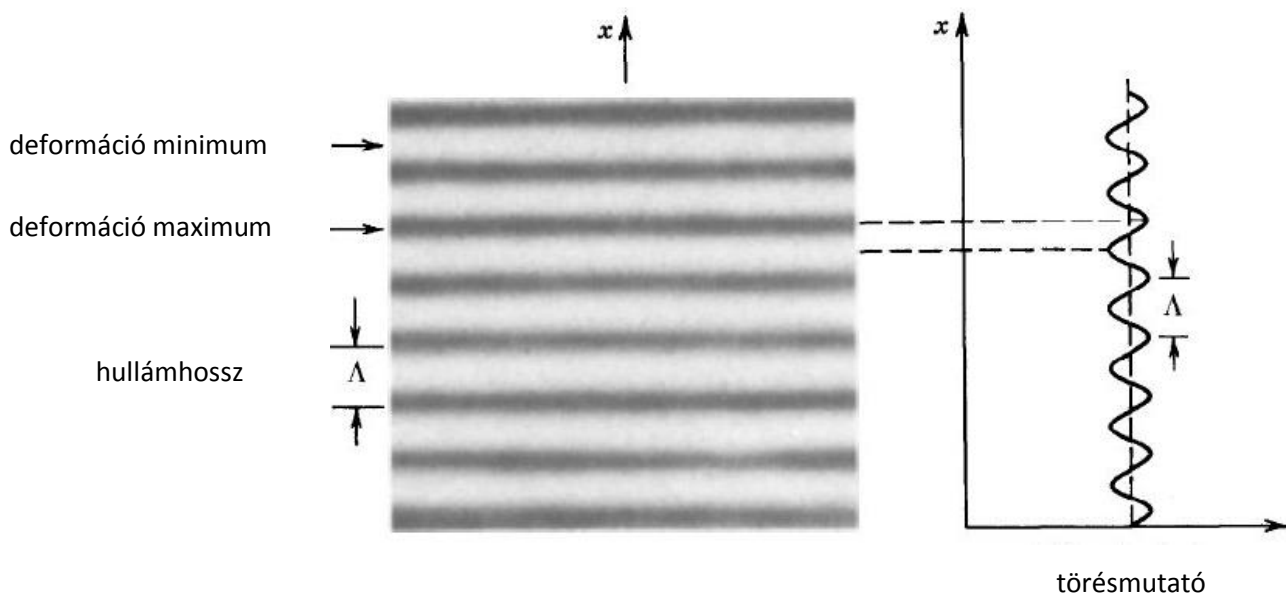
$$\Delta n_{i,j} = \frac{1}{2} n^3 p_{i,j,k,l} S_{k,l} \quad (1.1)$$

ahol

- n – a közeg törésmutatója
- $\Delta n_{i,j}$ – a törésmutató megváltozásának tenzora
- $p_{i,j,k,l}$ – a fotorugalmassági állandók tenzora
- $S_{k,l}$ – a deformáció tenzor

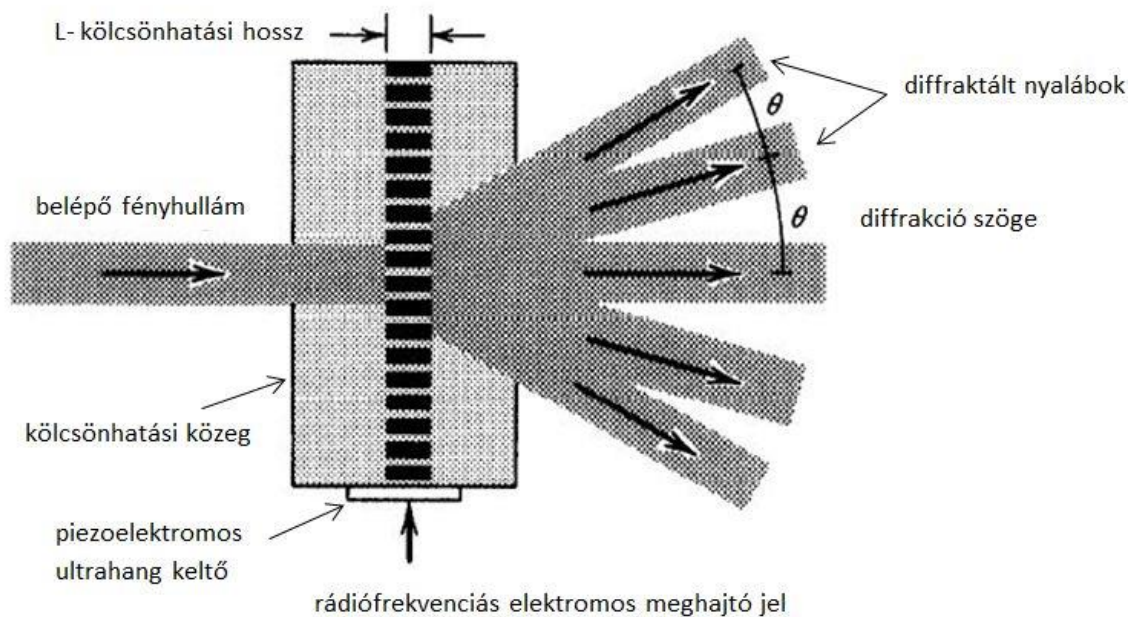
Az egyenletben az Einstein-féle jelölésnek megfelelően az ismétlődő indexekre összegezni kell.

A közegben így egy törésmutató fázisrács jön létre, amelynek periódusa megegyezik az akusztikus hullámhosszal, amplitúdóját pedig (1.1) összefüggés alapján határozhatjuk meg (1.1.1 ábra)



1.1.1 ábra – Akusztikus hullám által létrehozott törésmutató rács [3.91]

Ha ugyanebben az anyagban (a továbbiakban kölcsönhatási közegben) fényhullámok terjednek, azok elhajlanak ezen a fázisrácscon, vagyis diffraktálódnak (1.1.2. ábra). Az ábrán a közegek határán a fénytöréstől eltekintettünk.



1.1.2 ábra – Akusztó-optikai Raman-Nath diffrakció [3.91]

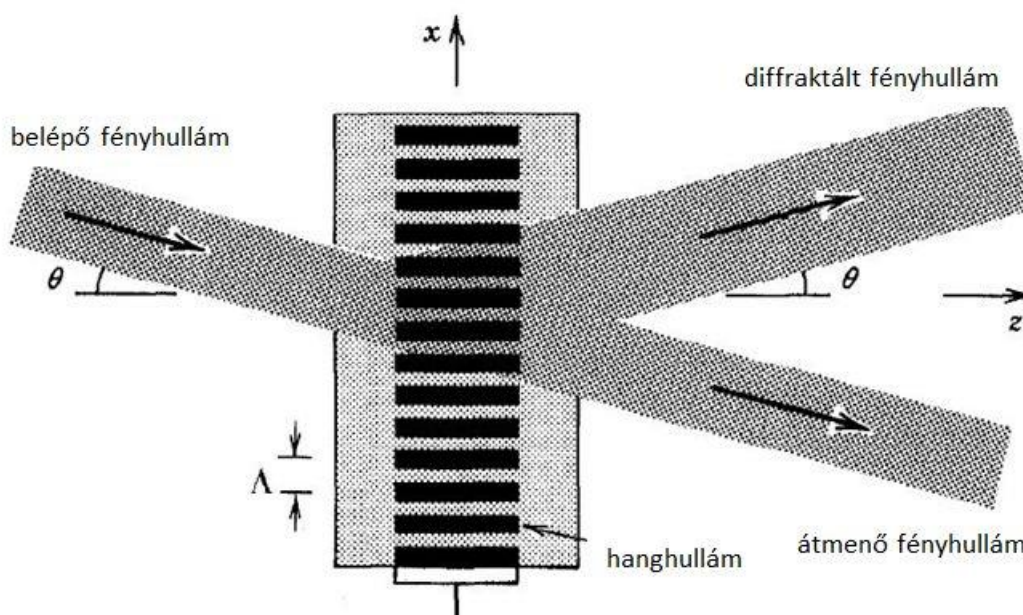
A sokrendű diffrakciót Debye és Sears mutatta ki először 1932-ben [3.2], és a Raman és Nath által síkhullámokra kidolgozott matematikai modell írja le a jelenséget, ha a tíznél magasabb diffrakciós rendek is megjelennek (Raman-Nath diffrakció [3.3]).

Ha az akusztikus hullám frekvenciáját megnöveljük, a magasabb diffrakciós rendek eltűnnek. Az első diffraktált rend intenzitásának maximuma van, ha a belépő fény iránya és az akusztikus hullámfrontok által bezárt szögre teljesül, hogy

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda} \quad (1.2)$$

ahol θ_B – a fényhullám iránya és az akusztikus hullámfrontok által bezárt szög
 λ – a fény hullámhossza vákuumban
 Λ – az akusztikus hullám hullámhossza

Ezt a jelenséget, amelyet az akuszto-optikai eszközökben, ahol a magasabb diffrakciós rendekre nincs szükség, felhasználunk, Bragg diffrakciónak nevezzük (1.1.3 ábra). Első matematikai modelljét Phariseau dolgozta ki a Raman-Nath elmélet továbbfejlesztésével [3.4].



1.1.3 ábra – Akuszto-optikai Bragg diffrakció [3.91]

Eszerint a diffraktált nyaláb intenzitása

$$I_d = I_b \left(\frac{\xi}{2\sigma} \right)^2 \sin^2 \sigma \quad (1.3)$$

ahol I_d – a diffraktált nyaláb intenzitása
 I_b – a belépő nyaláb intenzitása (a reflexiók veszteségektől eltekintünk)

$$\xi = -\frac{k\Delta n L}{\cos \theta_b} \quad (1.4)$$

$$\sigma^2 = \zeta^2 + \left(\frac{\xi}{2}\right)^2$$

$$\zeta = KL (\sin \theta_b - \sin \theta_B) / 2 \cos \theta_b$$

k – a fény hullámszáma

K – az ultrahang hullámszáma

L – a kölcsönhatási hossz (az ultrahang nyaláb fényterjedés irányába eső szélessége)

θ_b – a fényhullám belépésének szöge

θ_B – az (1.2) feltételt kielégítő Bragg szög

Az említett két modell extrém és idealizált esetben írja le a kölcsönhatást, amelyet egy Q paraméter bevezetésével [3.5] választhatunk szét könnyen Raman-Nath és Bragg diffrakcióra.

$$Q = \frac{K^2 L}{k \cos \theta_B} \quad (1.5)$$

Ha $Q < 1$ akkor Raman-Nath, ha $Q > 7$ akkor pedig Bragg diffrakcióról beszélünk. A diffrakciót az átmeneti tartományban is helyesen leíró modellt Klein és Cook dolgozott ki 1967-ben [3.5].

Az (1.4) összefüggésben a Δn törésmutató változás az (1.1) következtében az akusztikus hullám által keltett mechanikai deformáció függvénye. Az akusztikus hullámban terjedő teljesítmény [3.6], [3.7].

$$P_a = \frac{1}{2} \rho v^3 S S^* L H \quad (1.6)$$

ahol ρ – a kölcsönhatási közeg sűrűsége

v – a hang terjedési sebessége

S^* - a deformáció komplex konjugáltja

H – az akusztikus hullám L -re és a hullámterjedésre merőleges dimenziója

$\theta_b = \theta_B$ esetén, ha a beesés szögére teljesül a Bragg feltétel, (1.6) alapján a diffraktált nyaláb intenzitását leíró (1.3) egyenlet, a következő alakra hozható

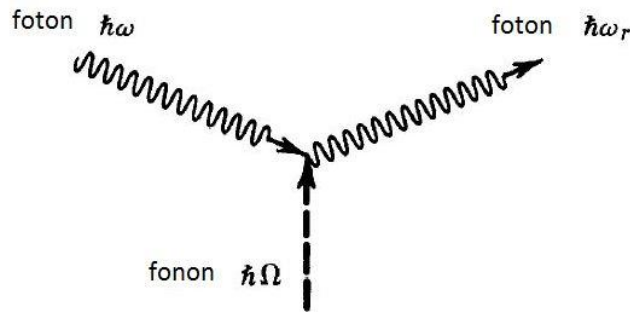
$$I_d = I_b \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda \cos \theta_b} \sqrt{\frac{M_2 P_a L}{2H}} \right) \quad (1.7)$$

ahol $M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}$, csak az anyagra jellemző mennyiségeket tartalmazó akusztó-optikai jósági tényező.

A diffrakció sáv szélessége (1.3) - ből határozható meg [3.16]. Ha ξ kicsi, akkor

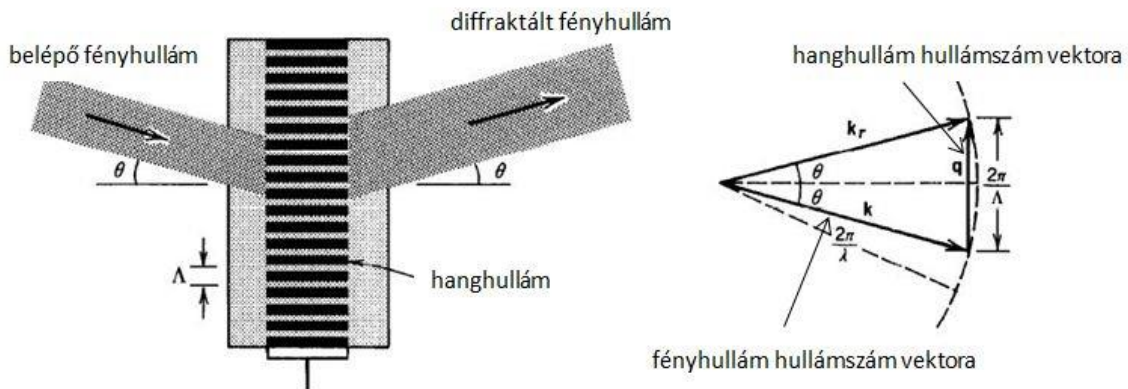
$$\Delta f_{\text{izotróp}} = 1,8 n v^2 \cos \theta_b / \lambda f_0 L \quad (1.8)$$

A diffrakciós geometria leírható foton-fonon kölcsönhatásként is (1.1.4 ábra), ahol mind az energia, mind az impulzus megmaradás feltételének egyidejűleg teljesülnie kell [3.9].



1.1.4 ábra – Foton-fonon kölcsönhatási geometria [3.91]

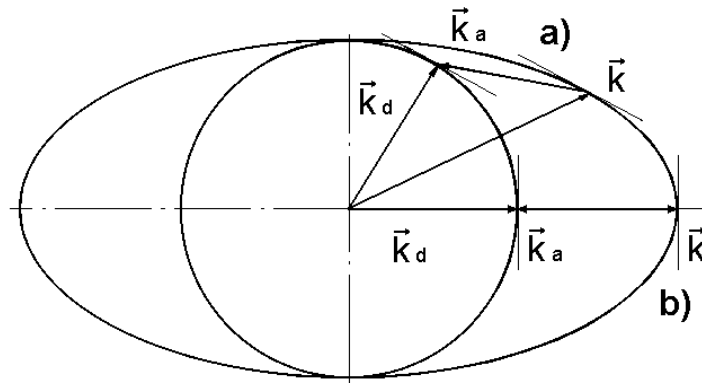
Az energia megmaradás esetünkben az $E = hf$ Planck törvény alapján (ahol E a fotonok illetve a fonon energiája, h a Planck állandó, f pedig a frekvencia) azt jelenti, hogy a diffraktált foton frekvenciája éppen a belépő fény és az ultrahang frekvencia összege (1.1.4 ábra). Ez klasszikusan is értelmezhető a hang sebességével mozgó rácson történő diffrakció következtében létrejövő Doppler frekvencia eltolódásként.



1.1.5 ábra – Bragg diffrakció, mint foton-fonon kölcsönhatás [3.91]

Az impulzus-megmaradás feltétele a hullámszám vektorok vektori összegzését jelenti az 1.1.5 ábrán látható módon. Vegyük észre, hogy ez alapján éppen az (1.2) szerinti összefüggést kapjuk a beesés és a diffrakció szögére.

Anizotróp esetben, optikailag kettőstörő anyagokban a diffrakció úgy jön létre, hogy megváltozik a fényhullám polarizációs állapota is. A beeső és a diffraktált hullám polarizációja egymásra merőleges, sebességük és a hozzájuk tartozó törésmutató is különböző. Az 1.1.6 ábrán az ordinárius (irányfüggetlen) illetve az extraordinárius (irányfüggő) törésmutatóhoz tartozó optikai hullámszámvektorok és akusztikus hullámszámvektor irányokat és abszolút értékeket tüntettem fel két alapesetben, nem kollineáris illetve, kollineáris diffrakcióra. Kollineáris diffrakcióról akkor beszélünk, ha valamennyi hullám terjedés iránya egy egyenesbe esik.



1.1.6 ábra – Anizotróp akusztó-optikai kölcsönhatás. A belépő \vec{k} és a diffraktált \vec{k}_d nyaláb terjedési sebessége és polarizációja különbözik. Ebben az esetben \vec{k}_a akusztikus hullám irányának megválasztásával a) nem kollineáris, illetve b) kollineáris geometria megvalósítására is van lehetőség.

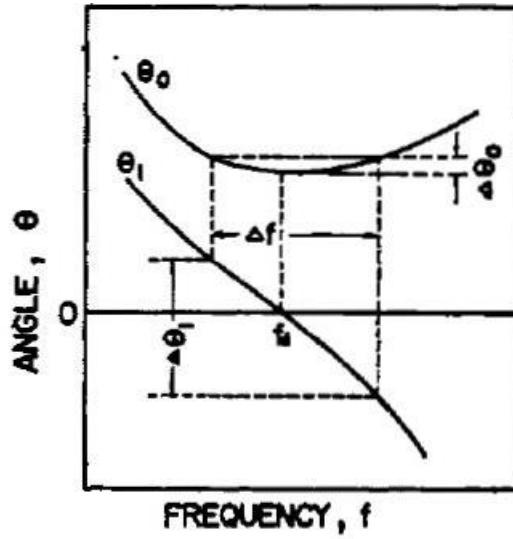
A jelenséget Chandrasekharan mutatta ki először 1965-ben [3.8] és részletes analízisét a [3.9-3.13] cikkekben találhatjuk.

Bizonyítható, hogy a diffraktált nyaláb intenzitása akkor maximális, ha a beeső és a diffraktált hullám irányára teljesülnek az alábbi feltételek [3.9] (1.1.7 ábra)

$$\sin \theta_b = \frac{\lambda}{2n_b\Lambda} \left[1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} (n_b^2 - n_d^2) \right] \quad (1.9)$$

$$\sin \theta_d = \frac{\lambda}{2n_d\Lambda} \left[1 - \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} (n_b^2 - n_d^2) \right] \quad (1.10)$$

ahol n_b a belépő, n_d pedig a diffraktált hullámhoz tartozó törésmutató.



1.1.7 ábra – Beesési és diffraktált szögek anizotróp diffrakció esetére [3.9] alapján ($\theta_0 = \theta_b$, $\theta_1 = \theta_d$, $f_d = f_0$)

Az (1.9-10) összefüggést vizsgálva belátható, hogy

$$f_0 = \frac{v}{\lambda} \sqrt{|n_b^2 - n_d^2|} \quad (1.11)$$

akusztikus frekvencia esetén $\theta_d = 0$ és a θ_b beesési szögnek minimuma van (1.17 ábra), valamint az f_0 frekvencia környékén a diffrakció sáv szélessége

$$\Delta f_{\text{anizotróp}} = 2v \sqrt{2n_o \frac{\cos \theta_b}{\lambda L}} \quad (1.12)$$

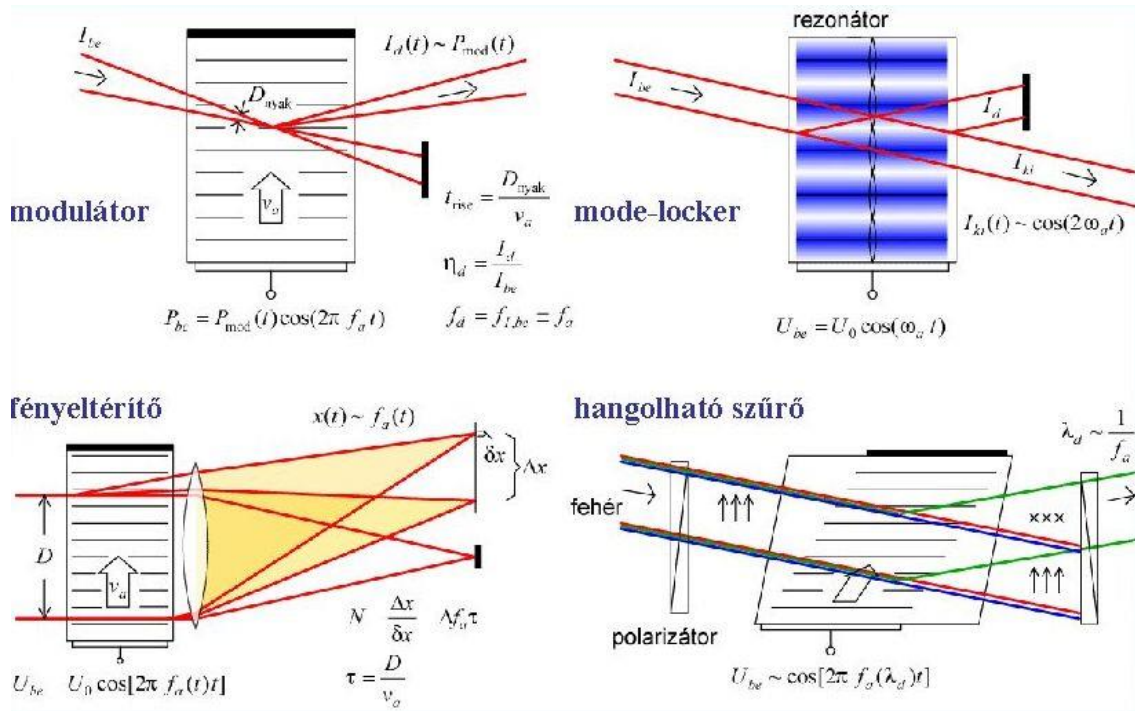
ahol n_o az ordinárius törésmutató. Összehasonlítva az izotróp diffrakció (1.8) sáv szélességével belátható, hogy a gyakorlatban $\Delta f_{\text{anizotróp}} \gg \Delta f_{\text{izotróp}}$ mindig teljesül [3.16].

Az f_0 frekvencia optikailag kettőtörő anyagokra GHz körüli érték, ami nagyon magas frekvencia, ha figyelembe vesszük, hogy az anyagok akusztikus csillapítása a frekvencia négyzetével fordítottan arányos [3.15], valamint azt a tényt, hogy a kis akusztikus csillapítású anyagok M_2 akusztó-optikai jósági tényezője jellemzően nagyon alacsony [3.16].

Optikailag aktív anyagokban az ordinárius és extraordinárius sugárhoz tartozó törésmutatók az optikai tengely mentén sem azonosak, bár a törésmutató különbség nagyon csekély. Például TeO_2 (tellurdioxid) esetén a különbség $4,7 \cdot 10^{-4}$, ami lényegesen kisebb, mint az ordinárius és extraordinárius törésmutató különbsége [3.14].

Ekkor az f_0 frekvencia 633 nm hullámhosszúságú fényre 30 MHz, a $\Delta f_{\text{anizotróp}}$ pedig szintén 30 MHz lesz, ami a négyszerese az izotróp diffrakció sávszélességének ($L = 5 \text{ mm}$).

Az ultrahangot rádiófrekvenciás gerjesztéssel a kölcsönhatási közegre erősített piezoelektromos lapkával keltjük. Az eszközök fontosabb alkalmazási területeit az 1.1.8 ábrán foglaltam össze.



1.1.8. ábra – Akusztó-optikai kölcsönhatás konfigurációk és alkalmazások

Amennyiben az ultrahang amplitúdóját időben változtatjuk, a diffraktált nyaláb optikai intenzitás modulációja az eredmény, az ilyen célú eszközöket modulátoroknak nevezzük. Ha állóhullámú akusztikus teret hozunk létre (párhuzamos kölcsönhatási közeg felületekkel), a diffraktált optikai nyaláb szinuszos modulációját kapjuk, a meghajtó RF frekvencia kétszeresével. Ezt optikai rezonátorban periodikus veszteségeként a longitudinális rezonátor módusok szinkronizálására, rövid fényimpulzusok keltésére használhatjuk (mode-locker). A frekvencia változtatásával szögben pásztázó nyaláb (fényeltérítő), vagy fehér fény megvilágítással monokromatikus diffrakció (elektronikusan hangolható optikai szűrő) az eredmény [3.16].

Láttuk tehát, hogy az akusztó-optikai kölcsönhatás jellemző mértéke a diffrakciós határfok, a diffraktált nyaláb intenzitása a belépőhöz viszonyítva (a reflexiós veszteségektől ilyenkor általában eltekintünk). A jelenség könnyen kimutatható pl. vízben már néhány MHz-es frekvenciákon [3.2, 3.3]. Gyakorlatban is használható konstrukciók kifejlesztéséhez, azaz a 90-95 %-os hatásfok eléréséhez nemcsak a megfelelő fényforrásokra (lézerekre), hanem a jelenség alkalmazása szempontjából kedvező tulajdonságú, szilárd fázisú anyagokra is

szükség volt. Ilyeneket, mint pl. a Pb_2MoO_5 (ólommolibdát) [3.17] és a TeO_2 (tellurdioxid) [3.18, 3.19], a hetvenes évek elején sikerült egykristály formában először használható méretekben előállítani. Ahogy ezeknek az anyagoknak a minősége (tisztasága, akusztikus és optikai csillapítása, reprodukálható mérete) javult, úgy váltak szinte egyeduralkodóvá a területen. A hetvenes évek elején publikálták elsősorban az Egyesült Államokban és Japánban az első kísérleteket, gyors modulátor [3.20] és akusztó-optikai szűrő konstrukciókat [3.21] TeO_2 kölcsönhatási közeggel, nem kollineáris elrendezésben [3.22], szélessávú fényeltérítőket izotróp és anizotróp konfigurációkban [3.16].

1.2. Az akusztó-optikai eszközök előállítási technológiája

A nemzetközi kutatási irányokhoz csatlakozva Magyarországon az akusztó-optikai eszközök gyártási technológiájának, tervezési és mérési módszereinek kidolgozása az MTA SZTAKI, Podmaniczky András, Tőkés Szabolcs [3.23-3.25], Márkus Lenk Attila, valamint a BME Fizikai Intézet, Giber János, Behringer Tibor együttműködésében kezdődött, még a 70-es évek közepén, elsősorban lézer printer és lézer plotter alkalmazásokra [3.26]. Később a teljes akusztó-optikai eszköz fejlesztést a BME átvette, a kissorozatú gyártás megvalósításában Giber János témavezetése mellett Kocsányi Lászlóval, Várkonyi Sándorral és Nádudvari Rudolffal közösen már én is részt vettem. Diplomamunkámat 1981-ben az eszközök vizsgálatából, egyetemi doktori fokozatomat 1985-ben a kissorozatú gyártás kidolgozásából [2.1-2.3], kandidátusi értekezésemet pedig akusztó-optikai jelfeldolgozás témakörben 1990-ben készítettem el [2.4-2.10, 2.25]. A munka során számos szabadalmi bejelentés is született [2.11-2.16].

1.2.1 Kristálynövesztés és megmunkálás

A TeO_2 (tellurdioxid) kedvező optikai és akusztó-optikai tulajdonságai miatt került a kutatások középpontjába [3.27-3.29]

A laboratórium eredményeihez jelentősen hozzájárult az MTA Kristályfizikai Kutató Intézete (ma MTA Wigner FK SZFI) kiváló minőségű TeO_2 és LiNbO_3 optikai anyagokkal [3.30-3.33]. Az intézetben a kristályok előállítása Czochralski eljárással, részben saját fejlesztésű, korszerű berendezésekkel történt (1.2.1 kép).



1.2.1 kép - Optikai egykristályok (<http://www.szfi.hu/HU/crystalphys>)

A 80-as évek végére kiépült a BME Atomfizika Tanszékén a teljes kristályfeldolgozás (röntgen orientálás, szeletelés, optikai megmunkálás – 1.2.2 kép), vékonyréteg felvitel párologtatással (ultrahangkeltő fémzés és antireflexiós bevonatok) és RF porlasztással (ultrahang-transzformátor), piezoelektromos ultrahangkeltő technológia 10 MHz-2 GHz tartományra.

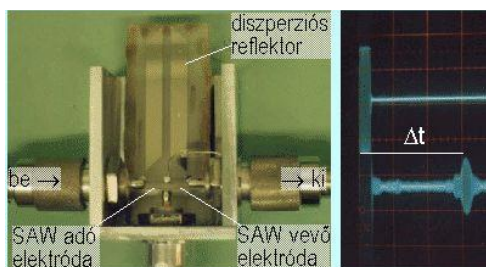
Optikai megmunkálás:

- precíziós vágás, csiszolás, polírozás

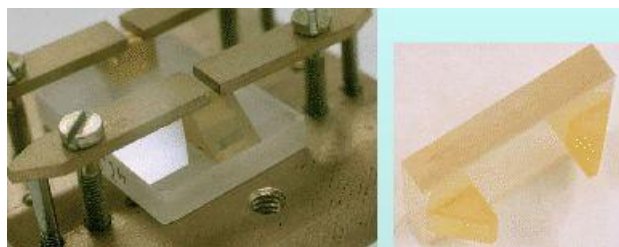


1.2.2 kép - Optikai megmunkáló műhely a BME Atomfizika Tanszékén

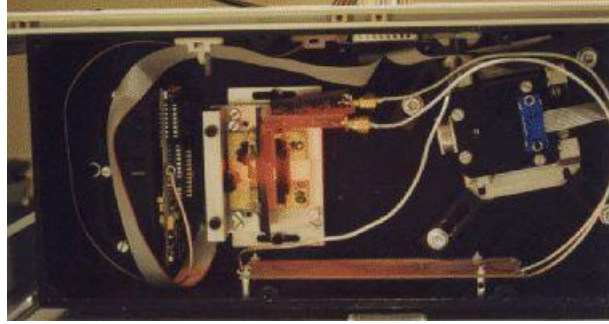
Létrehoztuk az akusztó-optikai rendszerek fejlesztéséhez szükséges teljes mérési (optikai és rádiófrekvenciás) eszközparkot. Barócsi Attila és Maák Pál PhD hallgatók munkájának köszönhetően jelentősen erősödtek az alkalmazott tervezési és szimulációs módszerek, új eszközöket hoztunk létre, új módszereket fejlesztettünk nem csak a tömbhullámú, hanem a felületi hullámú, integrált optikai eszközök területén is [2.17-2.23], (1.2.3-1.2.5 képek).



1.2.3 kép - Felületi hullámú diszperziós késleltető vonal



1.2.4 kép - Planáris hullámvezető LiNbO₃ hordozón



1.2.5 kép - Integrált optikai felületi hullámú Bragg cella

1.2.2 Szélessávú ultrahangkeltő tervezése és készítése

Az eddig leírtak figyelembevételével, illetve az 1.1.8 ábra alapján beláthatjuk, hogy egy akusztó-optikai eszköz működését alapvetően az eszköz két fontos eleme határozza meg. Az egyik elem a kölcsönhatási közeg, s ennek fizikai tulajdonságai. Anizotróp közeg esetén ezenfelül a közeg orientációja, orientációjának pontossága. Ezek a paraméterek adják, határozzák meg a kölcsönhatás geometriáját, a hang-fény kölcsönhatás tulajdonságait. A másik fontos elem a konstrukcióban az ultrahangkeltő. Működési frekvencia tartománya, hatásfoka (beiktatási csillapítása), veszteségei az elektronosan vezérelhető optikai eszköz bemenő impedanciáját illetve elektromos és optikai sáv szélességét határozzák meg, sok esetben korlátozzák.

Akusztó-optikai eszközökben az akusztikus hullámokat piezo-elektromos átalakítóval hozzák létre. A piezo-elektromos anyagok viselkedését akusztikusan és elektromosan is anizotróp kristályokban a következő egyenletek írják le [3.1]:

$$T_{i,j} = c_{i,j,k,l} S_{k,l} - e_{k,i,j} E_k \quad (1.13)$$

$$D_i = e_{i,k,l} S_{k,l} - \varepsilon_{i,k} E_k \quad (1.14)$$

ahol $T_{i,j}$ - a mechanikai feszültség tenzora
 $S_{k,l}$ - a mechanikai deformáció tenzor
 E_k - az elektromos térerősség vektora
 D_i - az elektromos eltolás vektora
 $e_{k,i,j}$ - a piezoelektromos állandók tenzora
 $\varepsilon_{i,k}$ - a permitivitás tenzor
 $c_{i,j,k,l}$ - a rugalmassági modulusok tenzora

(Az ismétlődő indexekre az egyenletekben összegezni kell)

Tehát piezo-elektromos anyagokban az elektromos térerősség mechanikai deformációt és/vagy feszültséget hoz létre. Egy ilyen lapkát periódikusan változó elektromos térbe helyezve, abban mechanikai hullámok jönnek létre.

Az elektródák közé helyezett ultrahang keltő lapkát valamilyen kötőréteg kapcsolja a transzmissziós közeghez, ami esetünkben az akusztó-optikai eszköz kölcsönhatási közege, s amelybe az akusztikus hullámokat akarjuk juttatni. A piezo-elektromos lapkát úgy kell orientálni, hogy tiszta nyíró vagy longitudinális hullámokat hozzon létre, amelyek síkhullámoknak tekinthetők, ha az egyes elektróda illetve kötőrétegek hullámterjedésre merőleges dimenziója sokkal nagyobb, mint az akusztikus hullám hullámhossza.

Itt kell megjegyeznem, hogy akusztó-optikai eszközök esetén a gyakorlatban az ultrahang frekvenciák a 10 MHz - 3 GHz tartományba eshetnek, vagyis a hullám terjedési sebesség függvényében tipikusan 1 és 100 μm közötti akusztikus hullámhosszakkal kell számolnunk.

Úgynevezett hangolatlan lezárás esetén a lapkát egy Z_0 hullám impedanciájú koaxiális kábelben keresztül hajtjuk meg egy $R_g = Z_0$ belső ellenállású elektromos generátorról. Ha a disszipációtól eltekintünk, akkor a lapka által keltett akusztikus hullámok teljesítménye egyenlő lesz a generátorból felvett hasznos teljesítménnyel. A lapka tehát elektromos szempontból egy komplex Z impedanciának tekinthető, s hatásfoka, amely a generátorból felvett hasznos teljesítmény a kivehető maximálishoz képest [3.15]

$$\eta = \frac{4R_g \operatorname{Re}(Z)}{|R_g + Z|^2} \quad (1.15)$$

A komplex Z elektromos impedancia (melynek valós és képzetes része is frekvenciafüggő) a piezoelektromos lapka geometriai méreteinek, csatolási tényezőjének, $Z_a = \rho v$ akusztikus impedanciájának, valamint a hozzá kapcsolódó összes réteg vastagságának és akusztikus impedanciájának függvénye.

Számítására Meitzler és Sittig [3.34] valamint Reeder és Winslow [3.35] is dolgozott ki módszert a piezoelektromos lapka Mason ekvivalensét felhasználva. Mindkét modell alkalmas az ultrahangkeltőt jellemző frekvencia-hatásfok görbék meghatározására. Sittig részletesen megvizsgálta az elektróda és a kötőrétegek hatását is [3.36]. Lényeges, hogy a szélessávú működéshez két feltételnek kell egyidejűleg megfelelni. Az egyes rétegek akusztikus impedanciája ne térjen el egymástól jelentősen, s az egyes közbenső rétegek vastagsága az akusztikus hullámhosszhoz mérve elhanyagolható legyen.

A már említett hangolatlan lezárás akkor alkalmazható, ha teljesül az

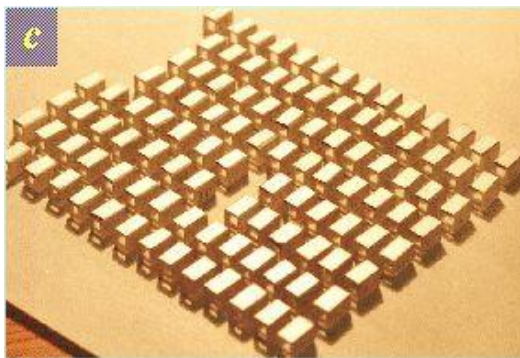
$$R_g = \frac{1}{\omega C} \quad (1.16)$$

feltétel, ahol ω az akusztikus körfrekvencia, C pedig az ultrahangkeltő terheletlen kapacitása.

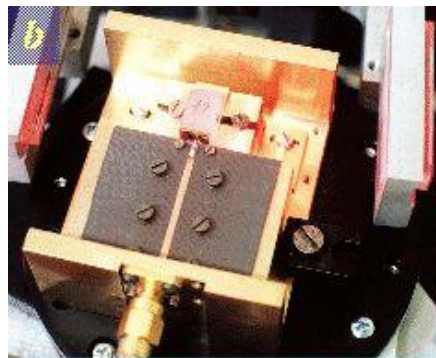
Az általunk használt ultrahangkeltő konstrukcióban a TeO_2 kölcsönhatási közeg különleges akusztó-optikai tulajdonságait [3.37] részben az [110] kristálytani irányú nyíró ultrahanghullám különlegesen alacsony (616 m/s) ultrahang terjedési sebességének köszönheti (ld. 1.7 összefüggés M_2 jósági tényező). Ez alacsony akusztikus impedanciát jelent, a piezoelektromos lapkaként használt LiNbO_3 kristály akusztikus impedanciája a TeO_2 közeg hatszorosa. A szélessávú működés „hasznos impedanciájú rétegek használhatóak illesztés nélkül” feltétele nem teljesíthető csak közbenső, úgynevezett $\lambda/4$ -es transzformátor réteg alkalmazásával. Erre alkalmas anyag az alumínium, amelyből hullámhosszban $\lambda/4$ -es, fizikailag 10-20 μm vastag réteg előállítása vákuumpárológatással nehézkes, jó minőségben inkább RF porlasztással lehetséges. Az általunk kidolgozott és használt, külső elektromos illesztést is tartalmazó ultrahangkeltő szerkezet részletes ismertetése a [2.12] szabadalmi leírásunkban található.

1.3. Akusztó-optikai eszközök, modulátorok, eltérítők, frekvencia átalakítók, hangolható optikai szűrők

A kilencvenes évektől kezdődően a teljes kissorozatú gyártási technológia a BME Atomfizikai Tanszéken kiépítésre került, így az 1.1.8. ábrán látható valamennyi akusztó-optikai alkalmazásra készítettünk, fejlesztettünk eszközöket (példaként ld. 1.3.1-2 képek).



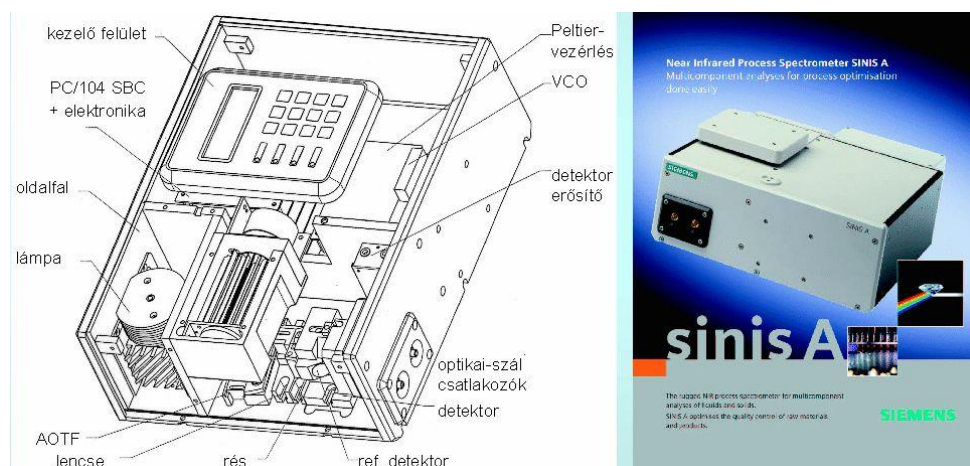
1.3.1 TeO_2 orientált hasábok optikai megmunkálás és fémezés után



1.3.2 GHz-es frekvencia tartományban működő akusztó-optikai fénytérítő

A hazai kutatások a nemzetközi igényekhez illeszkedve a közeli infravörös (1 μm és afeletti hullámhossz) tartományok felé elmozdulva, nemzetközi kapcsolatokon keresztül bővültek (Q-kapcsoló és módus csatoló fejlesztések H. J. Eichler, TU West-Berlin, kétdimenziós fénytérítők kutatása J. P. Huignard, Thomson CSF - Orsay, Párizs közreműködésével). 1996-tól kezdődtek a hangolható akusztó-optikai szűrő fejlesztések a NIR (közeli infravörös) 1-2 μm -es hullámhossz tartományra, amelyek a Siemens számára Dr. Kocsányi László

témavezetésében készült, ipari kivitelű spektrofotométerekben kerültek alkalmazásra (1.3.3 ábra) [2.24].

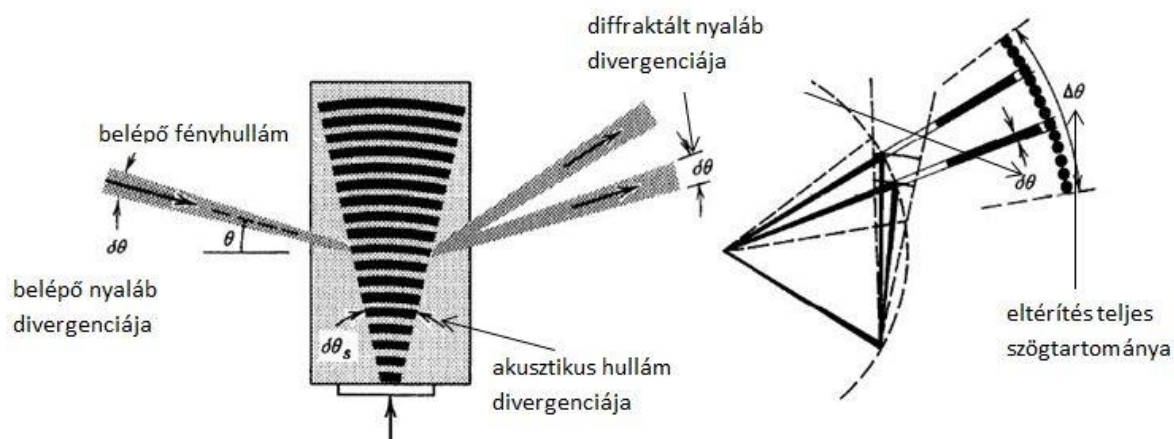


1.3.3 ábra - Közeli infravörös tartományban működő akusztó-optikai elvű spektrofotométer

H. J. Eichler (TU Berlin) és J. P. Huignard (Thomson) folyamatos kutatási feladatokkal és laborjaikon keresztül speciális vizsgálatokkal láttak el minket, amelyekre közös uniós pályázatot is nyertünk (Copernicus Project, Brussels, „Micromachining Application of a New Two-Dimensional Acoustooptic Deflector” Project No: CIPA-CT94-0216, 1995-1997). Ezeknek az eredményeknek köszönhetően néhány év alatt gyakorlatilag az akusztó-optikai elemek teljes palettáját le tudtuk fedni, minden szóba jöhető alkalmazásra készítettünk eszközt és építettünk köré valamilyen alkalmazást illetve rendszert.

1.4. Akusztó-optikai mérő rendszerek, RF spektrum analizátorok, RF iránymérő elvek

Az akusztó-optikai fénytérítők a meghajtó rádiófrekvenciás (RF) jel frekvenciájával arányosan térítik el a fényt [3.38].



1.4.1 ábra – Akusztó-optikai fénytérítő optikai felbontása

A megkülönböztethető nyalábok száma, a teljes eltérítési szögtartomány osztva a diffraktált nyaláb divergenciájával. A diffraktált nyaláb divergencia megfelelően megválasztott eszköz esetén, ha $\delta\theta_s \geq \delta\theta$ (lásd 1.4.1 ábra) egyenlő a belépő divergenciával.

Egyszerűen belátható, hogy

$$N = \tau \Delta f \quad (1.17)$$

ahol N az optikai felbontás (a megkülönböztethető pontok száma), Δf az eltérítés frekvencia tartománya, τ pedig az akusztó-optikai fénytérítő, amit ebben az alkalmazásban Bragg cellának is nevezünk, „idő ablaka”. Az idő, amely alatt az ultrahang áthalad az optikai nyalábon

$$\tau = D/v \quad (1.18)$$

D az optikai nyaláb átmérője, v az ultrahang sebessége.

Nagy optikai felbontáshoz alacsony ultrahang terjedési sebesség (TeO_2 -ban az $[110]$ irányú nyíró akusztikus hullámra 616 m/s) valamint nagy optikai apertúra ($D = 31$ mm, amire TeO_2 -ban közelítőleg 50 μsec adódik) szükséges.

Az eltérítés szöge nem túl nagy, a már korábban is említett anizotróp kölcsönhatási konfigurációban TeO_2 kristályban ez a szög mindössze 1 mrad/MHz.

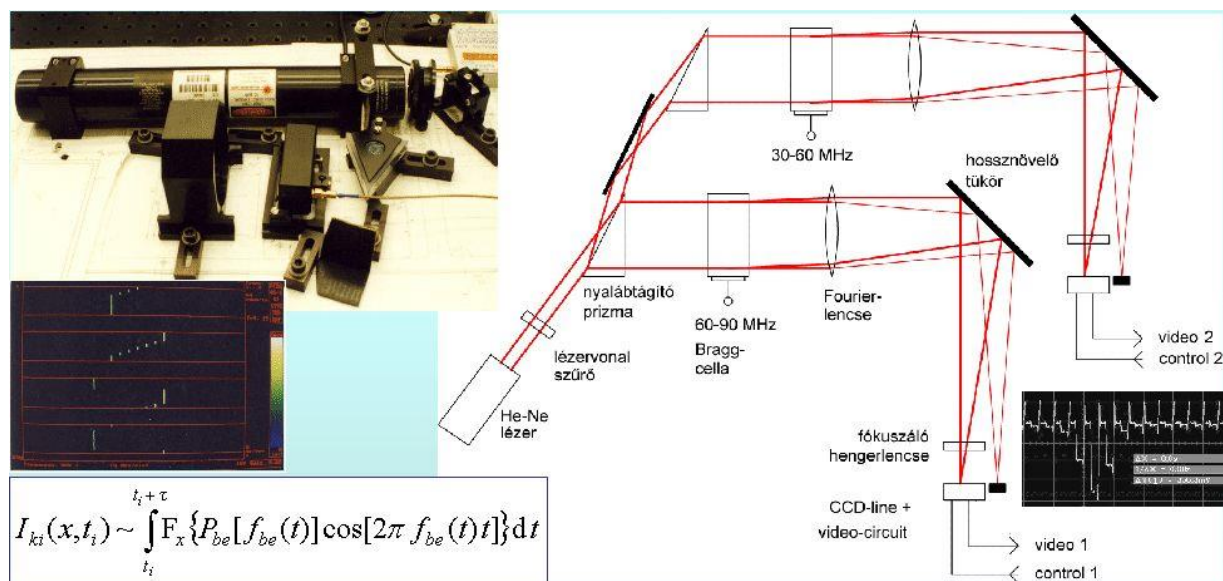
30 MHz sávszélességet feltételezve pl. 45 MHz sávközép környékén azonban (1.17) alapján az 50 μsec apertúrához 1500 pont felbontás tartozik, ami frekvenciában 30 MHz/1500 = 20 kHz-nek felel meg.

Ismert ugyanakkor a vékony optikai lencse azon tulajdonsága, hogy a hátsó fókusz síkjában az optikai tengelytől mérve a belépési szöggel arányos távolságra fókuszálja a nyalábot [3.39]. Ezt egyébként optikai Fourier transzformációnak is szoktuk nevezni egy térfrekvencia – hely transzformációs pár bevezetésével. Ha a lencse hátsó fókusz síkjába egy detektorsort (célszerűen CCD sort) helyezünk, minden egyes CCD pixelen megjelenő optikai jel egy bemenő elektromos frekvenciát jellemez, vagyis egy elektromos spektrumanalizáló berendezést kapunk [3.38].

A relatíve nagy optikai apertúra megvalósításához homogén akusztikus térre és pontos akusztikus hullám irányra van szükség, ennek vizsgálatát ilyen erősen anizotróp közegben [3.40-41] tartalmazza. A Bragg cella kialakítása esetünkben speciális kristálytani orientálási módszert is igényelt [2.11].

Az elv előnye, hogy a rádiófrekvenciás jel spektruma gyakorlatilag az ultrahang futási ideje (ez az az idő, mialatt a hang áthalad a fénynyalábon) alatt megjelenik, ami esetünkben 20 kHz frekvencia felbontás mellett 50 μsec egy teljes 30 MHz széles frekvencia sávra. Ezzel a sebességgel a hagyományos pásztázó elvű elektromos spektrum analízátorok nem tudnak

versenyezni, ezért az ilyen eszköz alkalmas gyorsan változó (pl. 5 msec alatt) frekvenciájú RF jelek 100 %-os felfedésére, kimutatására [3.42] [2.4-5].



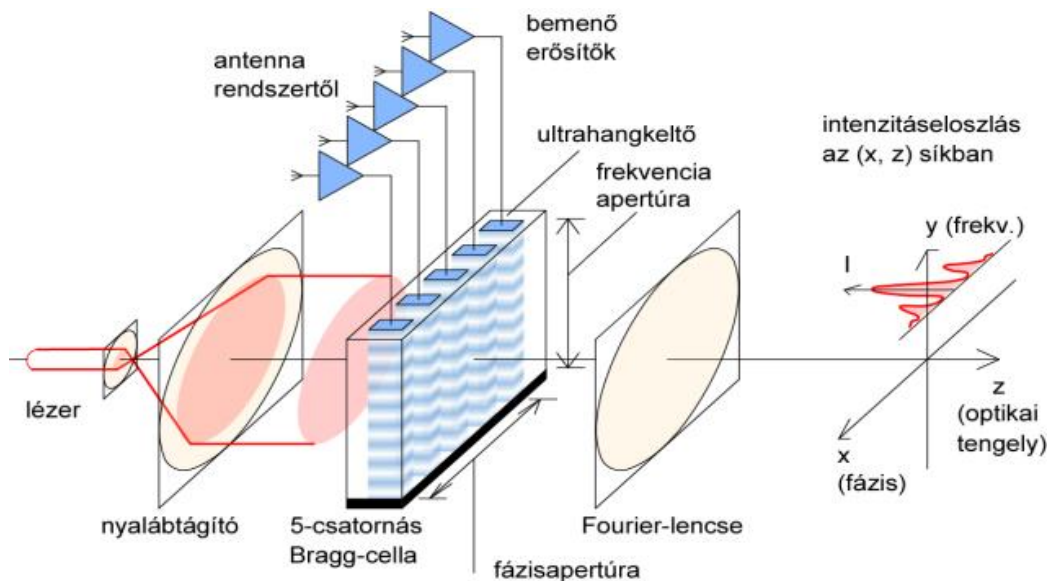
1.4.2 kép - Gyors, akusztó-optikai elvű RF spektrumanalizátor elrendezés



1.4.3 kép - Gyors, akusztó-optikai elvű RF spektrumanalizátor készülék

A 1.4.2-3 képeken a laboratóriumunkban a nyolcvanas évek végén kifejlesztett rendszer felépítése illetve a készülék látható [2.13]

A diffraktált optikai nyaláb megőrzi a meghajtó RF jel fázisát, ezért több fényeltérítővel, vagy egyetlen, többcsatornás fényeltérítő alkalmazásával lehetőség van a meghajtó elektromos jel fázisának, illetve lineáris antenna sorral a rendszert kiegészítve a beérkező elektromágneses hullám irányának meghatározására az 1.4.4 ábra szerinti elrendezésben.

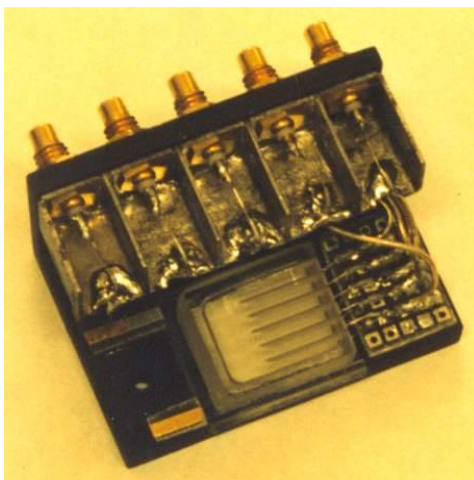


1.4.4 ábra - A rendszer elvi felépítése

A meghajtó jelek közötti fáziskülönbség a frekvenciaanalízisre merőleges irányban eredményez diffrakciós maximum elmozdulást, amelyből az irány meghatározható. A fáziskülönbség a hullámhossz és az antenna sor méret függvénye, ezért az elv elsősorban a GHz-es tartományban alkalmazható, ahol a rövid (≤ 30 cm) hullámhossz mellett kezelhető méretű (néhány méteres) antennasor alkalmazásával már CCD detektor mátrixon is a főmaximum detektálható, mérhető elmozdulását kaphatjuk [3.43].

Arra a kérdésre, hogy 100 MHz alatti frekvenciákon, vagyis 3 m-nél hosszabb hullámhosszakon az elv alkalmas-e iránymérésre, elméleti megfontolások és kísérleti eredmények alapján az 1990-ben benyújtott kandidátusi értekezésemben adtam választ [2.25, 2.15].

A kísérletekhez kifejlesztett ötcsatornás Bragg cella [2.16] az 1.4.5-ös képen látható.

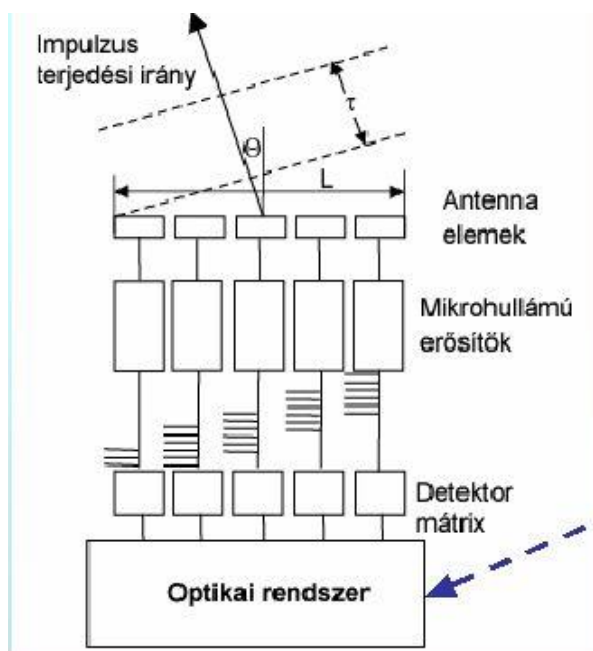


1.4.5 kép - A rendszer számára kifejlesztett ötcsatornás akusztó-optikai fényeltérítő

Az 1990-ben készült értekezés alapján a kandidátusi fokozatot 1992-ben szereztem meg. Ezért a jelen disszertációban az akusztó-optikai iránymérés területén a kandidátusi tézisekben nem szereplő, 1992-ben, illetve azután elért és publikált, az egyértelmű irány meghatározáshoz, és a rendszer kalibrációjához kapcsolódó eredményeket fogom ismertetni (3.3 fejezet).

1.5. Akusztó-optikai elvű „true-time” késleltető vonal

Fázisvezérelt antennákat olyan esetben használnak, ahol a radar rendszerben a hely/pozíció meghatározásához szükséges mechanikai pásztázásra nincs lehetőség. Az elektronikus pásztázás elvét az 1.5.1 ábrán mutatom be. A radar antennát diszkrét elemekre bontjuk, s az egyes antenna elemekre adott meghajtó impulzusokat egymáshoz képest késleltetjük, oly módon, hogy az antenna elemek által kisugárzott tér eredő hullámfrontja egy, a késleltetés által meghatározott irányba mutasson.



1.5.1 ábra – Fázisvezérelt antenna működése

A szükséges késleltetés mértéke csak az antennasor méretének és a szabadtéri hullámterjedés sebességének a függvénye. Rövid, pl. 10-20 nsec hosszúságú radar jelek esetén a késleltetés megvalósítására a fáziskésleltetés nem alkalmas. A frekvencia (illetve hullámhossz) függvényében más-más időbeli késleltetést kapunk, ami a széles spektrumú,

rövid impulzus térbeli széttartását, „szétkenődését” eredményezi. Ugyanakkor a radar mélységi „felbontását” a rövid impulzusoknak köszönhetjük.

A frekvencia független időbeli késleltetés megvalósítására az RF tápvonalak kitűnően alkalmasak, a késleltetési idő csak a tápvonal hosszától függ. Ez a késleltetés azonban nem vezérelhető, így a nyaláb pásztázása a tápvonal szakaszok kapcsolgatásával, nehézkesen oldható meg.

A probléma vizsgálatával, optikai elvű „true-time” késleltetés problémájával számos szerző foglalkozott. A változtatható optikai úthosszakat jellemzően különböző hosszúságú üvegszálakkal, vagy térbeli fénymodulátoros, esetleg polarizációs fényút választással, közvetlen futásiidő-különbséggel megvalósították meg [3.44-51].

Frigyes István és A. J. Seeds 1995-ben részletesen tanulmányozta az időbeli „true-time” késleltetés megvalósítására alkalmas optikai módszereket [3.52]. A hosszú tápvonalak kiváltására az általuk javasolt módszer, az időbeli késleltetés létrehozása úthossz diszperzióval. Ebben az esetben a rövid impulzust szétbontjuk frekvencia komponenseire, az egyes frekvenciakomponenseket egymáshoz képest időben késleltetjük, s a komponensek fázishelyes összeadása után az eredmény egy, a késleltető úthosszakhoz képest jelentős időbeli késés lesz.

Egy tápvonal esetében a fáziskésleltetés

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l = \frac{\omega l}{v} \quad (1.19)$$

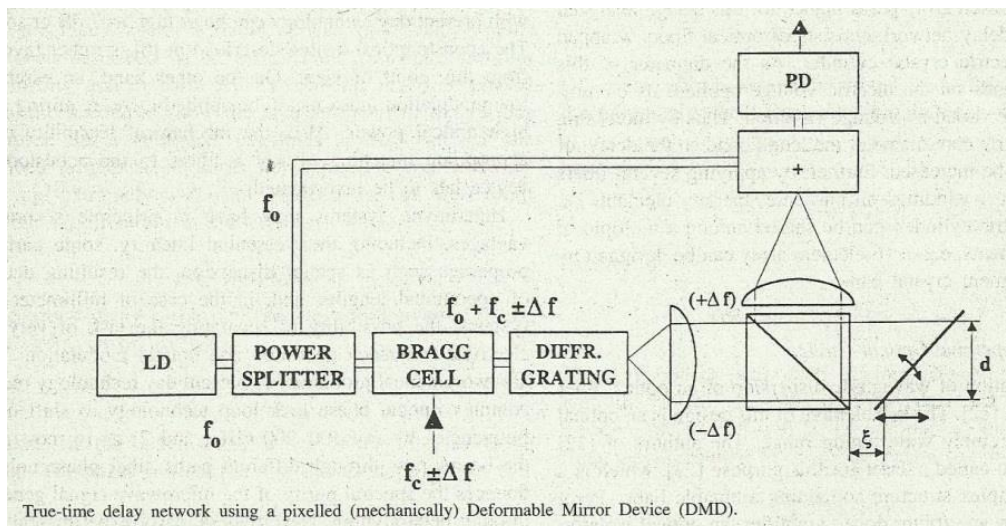
ahol λ az RF hullámhossz, l a tápvonal hossza, ω a jel körfrekvenciája, v a hullámterjedés sebessége a tápvonalban. Amennyiben az úthossz függ a frekvenciától, akkor $l = l(\omega)$ és az időbeli késleltetés (1.19) alapján

$$\tau = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{l(\omega)}{v} + \frac{\omega}{v} \frac{dl(\omega)}{d\omega} = \frac{l(\omega)}{v} \left(1 + \frac{\omega}{d\omega} \frac{dl(\omega)}{l(\omega)} \right) \quad (1.20)$$

Vegyük észre, hogy ha az optikai frekvencia-tartományba transzformálva, optikai frekvenciákon végezzük el a műveletet, akkor $\frac{\omega}{d\omega}$ nagyon nagy is lehet, vagyis már kis úthosszkülönbség is jelentős időbeli késleltetést okozhat.

Az (1.20) összefüggésnek egy másik következménye, hogy $l(\omega)$ –án keresztül a késleltetési idő mégiscsak függ a frekvenciától, de ez a függés, éppen a relatíve kis szükséges úthossz különbség miatt bizonyíthatóan elhanyagolható [1.13]

A feladat megoldására a [3.52]-ben az 1.5.2 ábra optikai elrendezését javasolták.



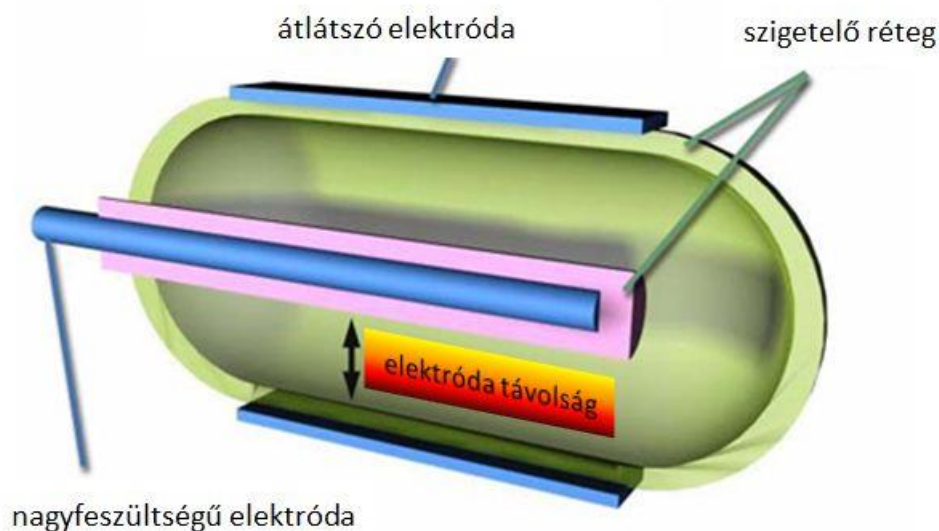
1.5.2 ábra - „True-time” késleltető vonal koncepció [3.52] alapján

A rádiófrekvenciás jelet egy akusztó-optikai cellával transzformáljuk az optikai frekvencia tartományba, a frekvencia szétválasztást optikai ráccsal hozzuk létre, a frekvenciafüggő úthossz késleltetést DMD (deformable mirror device) oldja meg, az RF jelet pedig egy optikai referencia oszcillátor ág felhasználásával, heterodin detektálással nyerjük vissza.

A javasolt elrendezés megvalósíthatóságával kapcsolatban már a cikkben is utalnak arra a problémára, hogy az elérhető diffrakciós rácsfelbontások vajon elegendőek-e a szükséges térbeli szétválasztáshoz. Ezen felül tisztázatlan marad a „deformable mirror device” pontos kialakítása és elhelyezése is [3.53, 3.54]. A 3.4 fejezetben ezekre a kérdésekre keresek választ és ezekre a problémákra adok megoldást.

1.6. Higanymentes DBD fluoreszcens lámpa

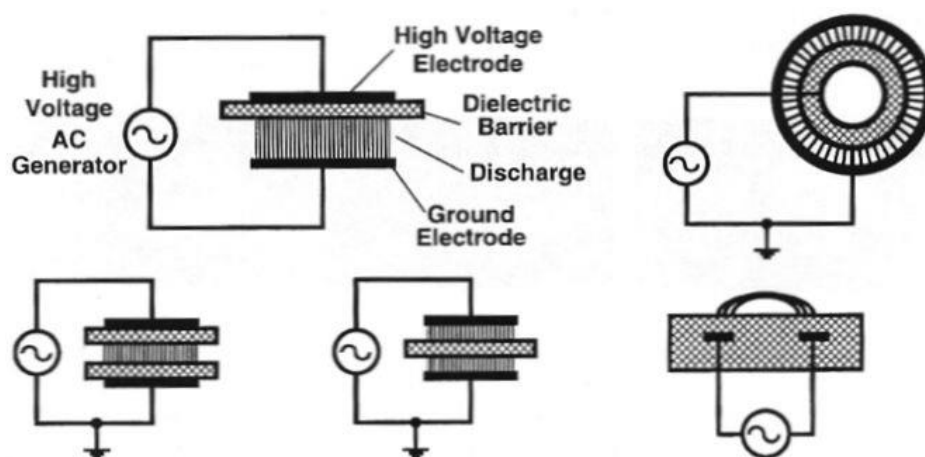
Dielektromosan gátolt gázkisülés (Dielectric barrier discharge – DBD) akkor jön létre, ha a kisülést létrehozó elektromos elektródákat elszigeteljük a kisülő tértől. Ebben az esetben csak változó terű, szinuszos vagy impulzus meghajtás jöhet szóba, az elektródák és a dielektrikumok által alkotott kondenzátort periódikusan fel kell tölteni és ki kell sütni. A fényforrás tipikus felépítése a 1.6.1 ábrán látható.



1.6.1 ábra - DBD lámpa felépítése

A módszert 1840-ben fedezték fel [3.55], s néhány évvel később 1857-ben W. Siemens már ózon levegőből történő előállítására javasolta [3.56]. A kisülés különlegessége, hogy szemben az alacsony nyomású fluoreszcens lámpák (fénycsövek) 5-10 mbar üzemi nyomásával, relatív nagy, 100 - 1000 mbar nyomáson is létrehozható. A kisülésben az egyébként egyatomos nemesgázokból speciális, ún. excimer (excited dimer) molekulák jöhetnek létre, amelyek az UV (ultraibolya) illetve a VUV (vákuum ultraibolya) tartományban sugározhatnak [3.57].

A kisülés planáris vagy hengeres kialakításban, egy és két szigetelő réteggel, valamint felületi geometriában is létrehozható (1.6.2 ábra)

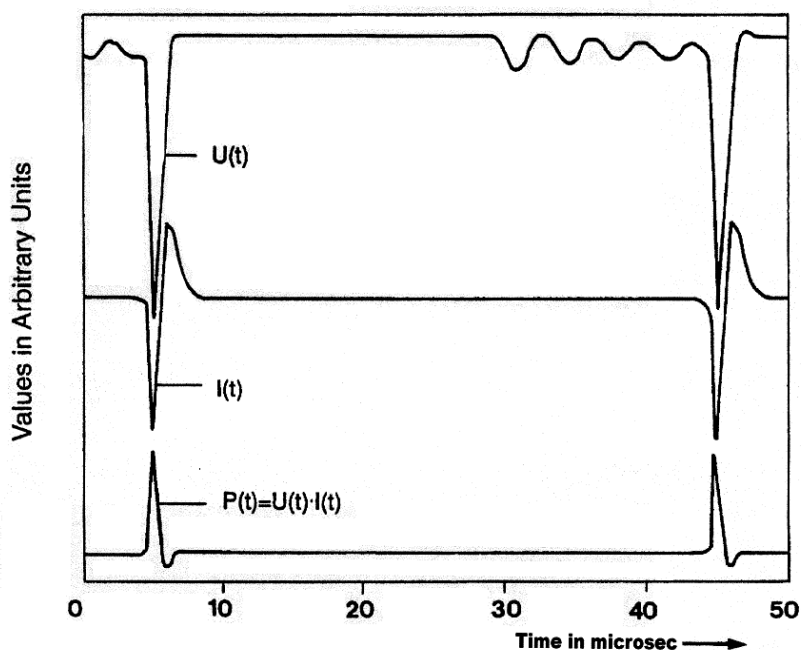


1.6.2 Különböző DBD lámpa konstrukciók [3.58]



1.6.3 kép - DBD mikrokisülés mintázat kvarc cellában, 5 mm távolságban lévő síkfelületek között különböző (emelkedő) gáznymások esetén (átmérő 8 cm) [3.59]

Az első UV alkalmazást 1955-ben publikálták [3.60], de az átlagos konverziós hatások (UV teljesítmény/ elektromos) még a következő évtizedekben sem haladták meg a 10-15 %-ot. Ennek - mint később kiderült - elsősorban az 1.6.3 képen látható ún. mikro kisülés jellegű szerkezet az oka. A kilencvenes évek végén jelent meg a fényforrás gyártók közül először az OSRAM a Xedarex márkanevű UV fényforrásával (1.6.5 kép), ahol egy szabadalmaztatott geometriával és rövid impulzus meghajtással sikerült homogén kisülést és 40 %-os kisülési hatások értékét is elérni (1.6.4 ábra) [3.61].



1.6.4 ábra - Feszültség-áram meghajtó jelalakok Vollkommer és Hitzschke vizsgálataiban (hengeres geometria, xenon gáz, elektróda távolság 1.2 cm) [3.61]



1.6.5 kép - Osram Xedarex 20 excimer UV lámpa

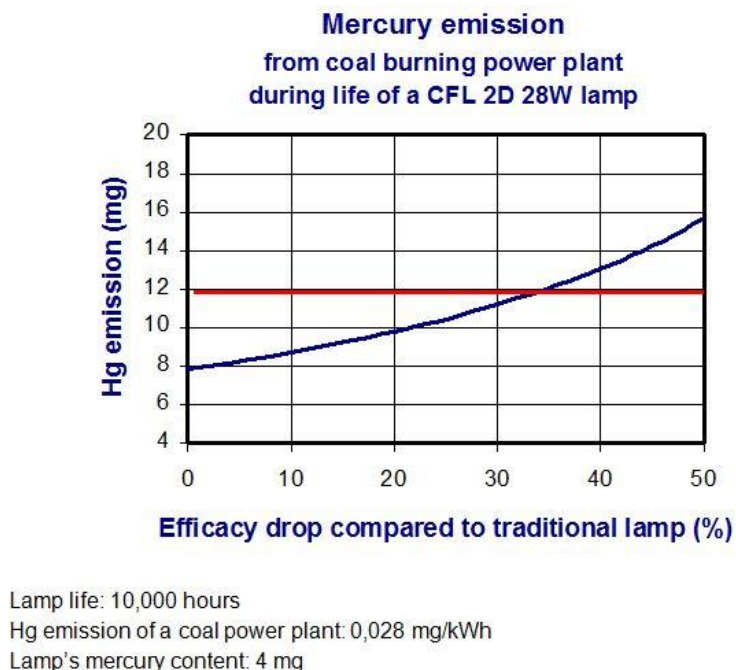
Ennek a fejlesztésnek a folytatásaképpen az OSRAM az 1998-as Hannoveri Vásáron mutatta be Planon márkanevű higanymentes, síkelektrodás, fluoreszcens lámpa termékét, amit elsősorban LCD (Liquid Crystal Display) kijelzők háttér világításának szántak, de irodai, otthoni használata is ajánlottak (1.6.6 kép).

Ez a termék, kedvező tulajdonságai ellenére, a különleges, impulzus jeleket adó meghajtó elektronika illetve a speciális síkforma miatt nem alkalmas arra, hogy a környezetvédelmi szempontból egyre terhelőbb, de a termikus sugárzókhoz képest jó fényhasznosítással rendelkező fénycsöveket, különösen a kompakt fénycsöveket kiváltsa.



1.6.6 kép - Osram Planon DBD lámpa

A hagyományos, ma is elterjedt és széles körben használt fénycsövek higanytartalma világ szinten jelentős környezeti terhelést és környezetvédelmi problémát jelent.



1.6.7 ábra – Szénerőművek higany környezeti szennyezése összehasonlítva a fénycsövek higany tartalma által okozott terheléssel [3.62]

A szénerőművek, amelyekből jelenleg a világ áramtermelésének jelentős hányada származik, szintén rendelkeznek kismértékű higanykibocsátással. Nincs értelme a jelenlegi fényforrásoknál nagyobb fogyasztású higanymentes lámpát fejleszteni, ha a többletfogyasztáshoz szükséges áram előállítása a kiváltásra szánt lámpákhoz hasonló mértékben terheli a környezetet. Az 1.6.7 ábrán látható az a 35 lm/W hatásfokcsökkenésküszöb [3.62], amelynél egy 28 W-os fényforrásra vonatkoztatva egy új fényforrás konstrukció kidolgozása környezeti terheléscsökkenést már nem eredményezne. A hagyományos 100-110 lm/W-os fénycsövek kiváltása érdekében ezért minimum 60-70 lm/W hatásfokú higanymentes fényforrások megvalósíthatóságára koncentráltunk a kutatás során.

Higanymentes, fluoreszcens fényforrás fejlesztésében közreműködésünket Dr. Reich Lajos, a GE (General Electric -Tungsram) kutatás akkori vezetője kezdeményezte 2002-ben. Az elsősorban a hagyományos kompakt fénycsövek versenytársának szánt DBD (dielectric barrier discharge) elvű lámpák tervezése, modellezése, szimulációi a BME Atomfizika Tanszéken (Beleznai Szabolcs), a kísérleti minták készítése és a mérések végzése a GE laboratóriumaiban történt. Sokat köszönhetünk Sonkoly Aurél csapatának a meghajtó és vizsgáló-mérő elektronikák fejlesztéséért (Hibrid Áramkörfejlesztés), és Maros Istvánnak (GE) kísérleti lámpák elkészítéséért és a vizsgálatokban nyújtott segítségéért.

1.7. Automatikus optikai vizsgáló rendszerek az elektronikai gyártásban

Az elektronikai gyártásban korábban a forraszkötések minőségét vizuálisan, szemmel ellenőrizték. A vizuális ellenőrzés hátránya, hogy szubjektív és lehetőségei korlátozottabbak az automatikus vizsgálatoknál. A nagyítók segíthetnek egy bizonyos szintig, ám az alkatrészek méretcsökkenése és szerelési sűrűségük már elérte és meghaladta az emberi ellenőrzés határait [3.63]. A digitális számítógépek, gépi látás és képfeldolgozás rohamos fejlődése a folyamat automatizálását tette lehetővé, nagyfelbontású kamerák, újfajta megvilágító eszközök [3.64], és technikák [3.65-67], valamint hatékony képfeldolgozó algoritmusok segítségével. A szakterületen elért eredmények összefoglalása az alábbi irodalmakban található [3.68-70].

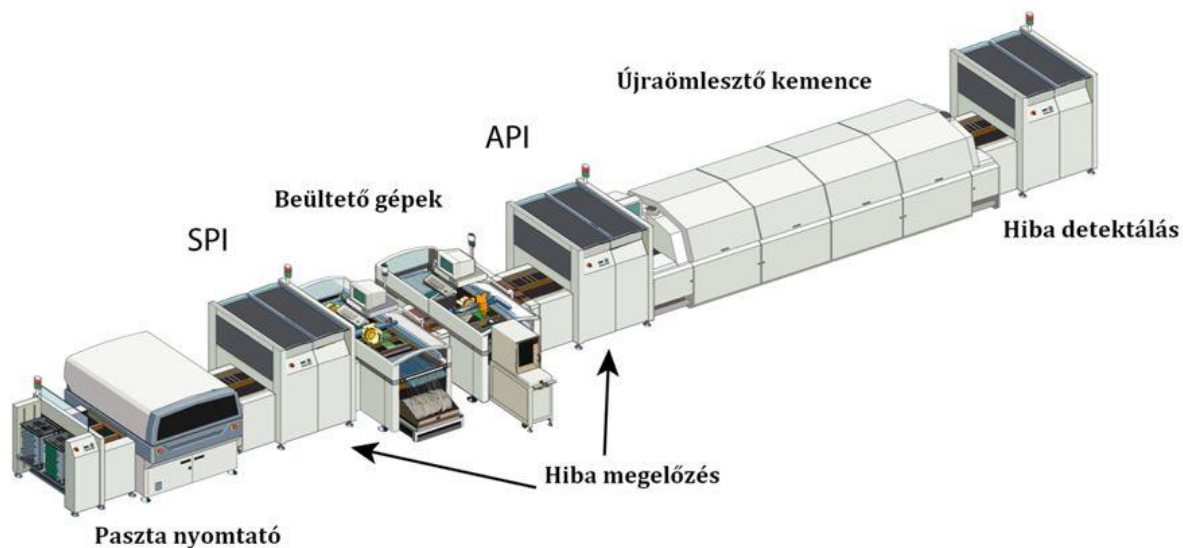
Ezért az elektronikai gyártásban, szereléstechológiában a kis alkatréשמéretetek, a nagy alkatrészs szám, az elvárt megbízhatóság (ld. 1.7.1 táblázat) valamint a hibák megelőzése, korai detektálása érdekében automatikus optikai vizsgáló módszereket alkalmaznak (1.7.2 ábra)

Sigma szám	Hibák száma / millió darab	Hibátlan arány	Folyamat-képesség
3	66 810	93,3 %	Cp = 1
4	6 210	99,4 %	Cp = 1,33
5	230	99,977 %	Cp = 1,67
6	3,4	99,9997 %	Cp = 2

1.7.1 táblázat – Tipikus hibaarány-követelmények SMT (surface mounted technology - felületszerelés), elektronikai gyártásban

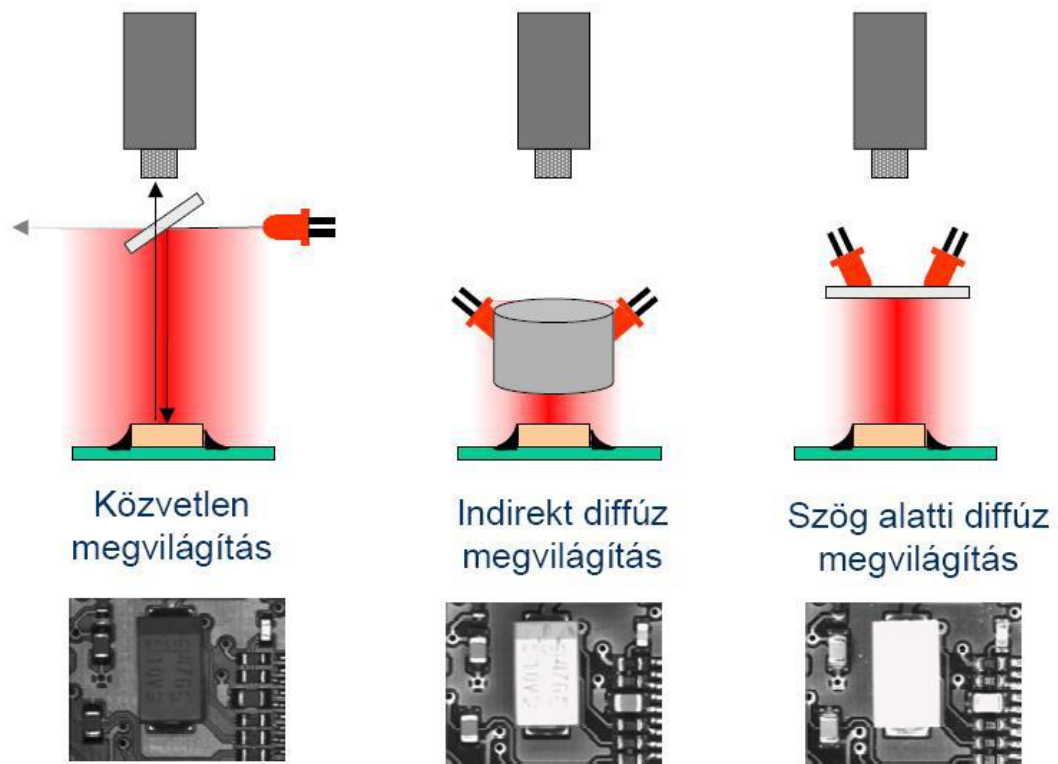
Ha forrasztási hely nem maradhat ellenőrizetlenül, átlagosan 4 másodperces forrasztási ciklusidőt és szerelőlemezenként 1000 forraszhelyet feltételezve, másodpercenként 250 darab optikai vizsgálatot kell elvégeznünk, különböző formájú és méretű (esetenként tizedmilliméteres) forrasz meniszkuszokon (gömbült felületeken).

Gyakorlatilag minden technológiai lépés, forraszpaszta nyomtatás, alkatrész beültetés, forrasztás ellenőrizhető optikai módszerekkel, ezért a gyártósoron tipikusan számos AOI (automatikus optikai vizsgáló) berendezést helyeznek el (1.7.2 ábra).

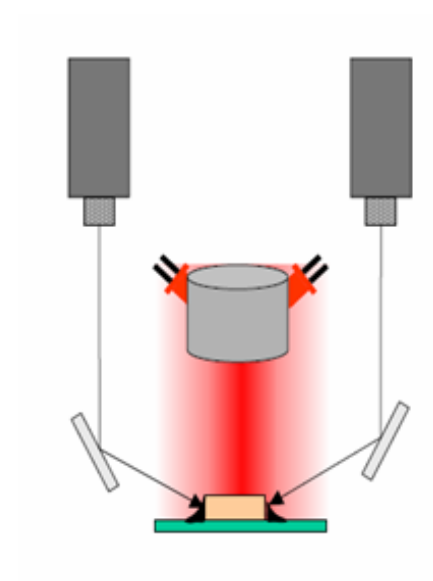


1.7.2 ábra – AOI berendezések elhelyezése a gyártósoron. Pasztanyomtatás után SPI (Solder Paste Inspection), beültetés után API (Automatic Placement Inspection), valamint forrasztás után PSI (Post-Soldering Inspection) [3.86].

Az egyes feladatokat sok kamerát tartalmazó (8-16 db merőleges illetve ferde kamera) rendszerekben, korábban a szerelőlemezeken, manapság a kamera és megvilágító rendszer (1.7.3 ábra) mozgatásával, „mérőautomatákkal” oldják meg, egyszerű szoftver képfeldolgozást és binarizálást (1.7.4 ábra) követő döntési szintek beállításával (1.7.5 kép).



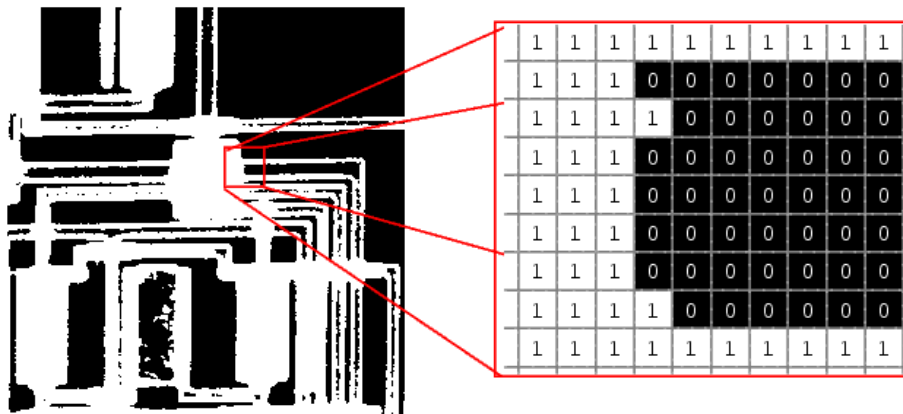
„Merőleges kamerás” elrendezések



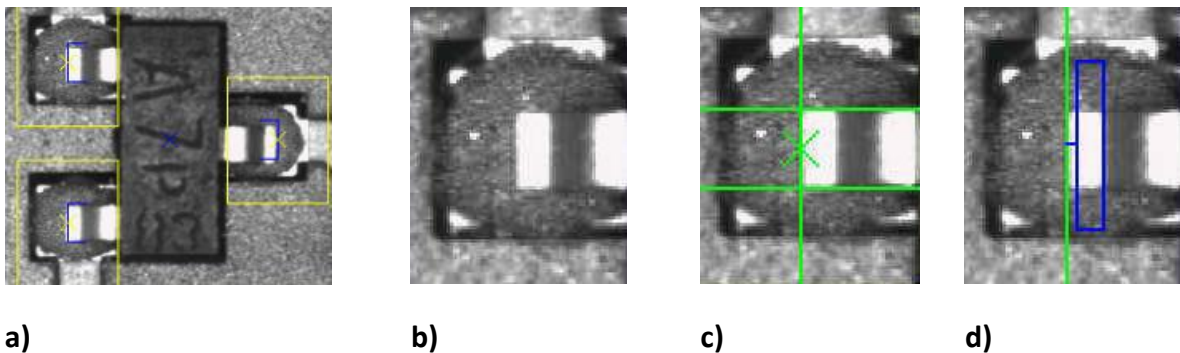
„Ferde kamerás” elrendezés

1.7.3 ábra – Tipikus AOI megvilágítási módszerek

dc_779_13



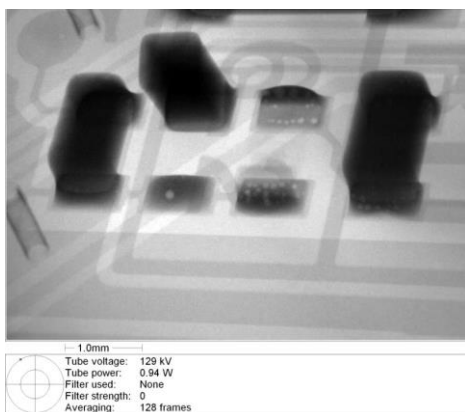
1.7.4 ábra – Szürkeárnyaltos kép binarizálás után, a vizsgált területet kinagyítva, a világos és sötét területek arányának meghatározásával



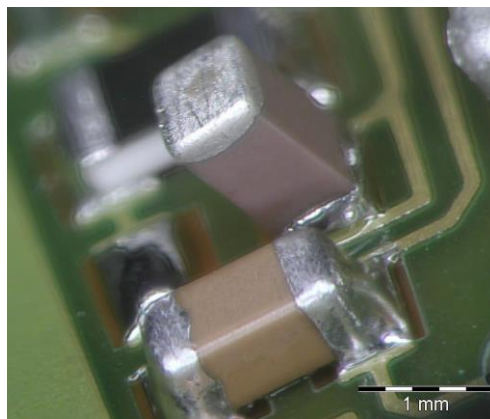
1.7.5 kép – Alkatrész lábak forrasztásának vizsgálata, a) vizsgáló ablakok kijelölése, b) ablak nagyítása, c) lábak élének megkeresése, d) forrasztás meniszkusz vizsgálata

Speciális problémát jelent az optikai módszerek alkalmazásával az úgynevezett sírkő effektus kimutatása. A jelenség, azaz a hibás forrasztás annak a következménye, hogy az újraömllesztéses forrasztás folyamatában a hőmérsékleti eloszlás nem egyenletes, ezért a forrasztás nem egyszerre ömlik, olvad meg az alkatrészek kötési felületein. Az egyik alkatrészvégén korábban megolvadt paszta a felületi feszültség következtében felemeli, felállítja az alkatrészt (1.7.6, 1.7.8 kép).

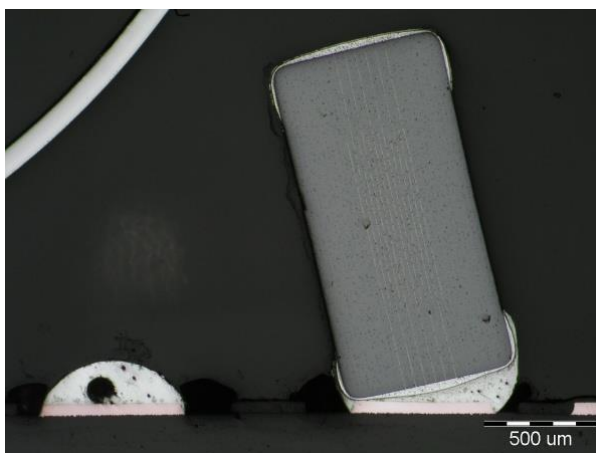
A jelenség kimutatása ferde kamerás elrendezésben lehetséges (1.7.7 kép). Ez azonban a kétszeresére növeli a vizsgálat idejét, mivel más kamera illetve nyomtatott huzalozású lemez pozíció szükséges hozzá. Ezért általában ezt a vizsgálatot csak nagyon kritikus esetekben alkalmazzák, a sírkőhibák az optikai vizsgálaton rendszerint átcsúsznak, csak az elektromos tesztelésnél szűrhetők ki és részletesebben roncsolásos módszerrel vizsgálhatóak (1.7.8 kép).



1.7.6 kép – Sírkő (tombstone) jelenség röntgenes vizsgálattal megjelenítve



1.7.7 kép – Sírkő jelenség ferde kamerás felvételen



1.7.8 kép – Sírkő jelenség merőlegesen csiszolt elektronmikroszkópos felvételen

A Villamosmérnöki és Informatikai Kar Elektronikai Technológia Tanszékén 2006-ban a Bosch részéről Szabó András kezdeményezésére indultak automatikus optikai vizsgálathoz kapcsolódó kutatások. Ezeket a Bosch eszközökkel (AOI berendezés, valamint számítógépek) és PhD ösztöndíjakkal is támogatta. A kísérleti munkákban, megvilágítás-demonstrációkban (LED rendszerekkel), a videofelvételek készítésében (ipari, megapixeles CCD színes és monokróm kamerákkal) Becker Ákos, Janóczki Mihály PhD hallgatók, valamint Berényi Richárd kollégám segített, míg a képfeldolgozási és szimulációs feladatok elvégzése Matlab környezetben elsősorban Janóczki Mihály, részben pedig Sinkovics Bálint PhD hallgató munkája volt.

2. A kutatások célkitűzései

Az előző, 1.3 – 1.7 fejezetekben bemutatott kutatási területeket sorba véve, az ott ismertetett eredmények és problémák figyelembevételével az alábbi kutatási feladatok, célkitűzések fogalmazhatók meg:

2.1 Impulzus-üzemű lézerekben akusztó-optikai Q-kapcsolókat illetve módus csatolókat (modulátor és mode-locker, lásd 1.1.8 ábra) széles körben alkalmaznak már a 70-es évek eleje óta. Ez egy tipikus optikai rezonátoron belüli alkalmazás, ahol a jellemző anyag, elsősorban kis optikai abszorpciója miatt a kvarc [3.16]. Akusztó-optikai tulajdonságai nem kedvezőek, akusztó-optikai jósági tényezője, diffrakciós hatásfoka kicsi. Mivel a diffrakciós hatásfok a hullámhossz négyzetével fordítottan arányos, az anyag hosszabb (infravörös) hullámhosszakon, melyek különösen orvosi alkalmazásokban fontosak, nem, vagy csak korlátozottan alkalmazható. Nagyobb diffrakciós hatásfokú eszközök a 3 μm hullámhossz körüli tartományra a 80-as évek végén már rendelkezésre álltak (Ti_3AsS_4 egykristályból vagy As_2S_3 üvegből), optikai csillapításuk (abszorpciójuk), illetve az akusztikus csillapítás által korlátozott optikai apertúrájuk miatt viszont kis veszteségű rezonátorokhoz nem voltak használhatóak [3.70-73].

Célkitűzés: TeO_2 nagy akusztó-optikai jósági tényezőjű közegből, nagy modulációs mélységű, hosszabb (2-3 μm) hullámhosszakon is elfogadható hatásfokú, optikai rezonátorban is alkalmazható eszköz létrehozása, használhatóságának kísérleti igazolása.

2.2 Lézernyalábok kétdimenziós pásztázását általában két, különálló akusztó-optikai fényeltérítővel, vagy egyetlen kristályon megvalósított kétdimenziós ultrahangtérrel oldják meg. Mindkét megoldás esetén a második eszköz, vagy ultrahangnyaláb egy változó szögű optikai nyalábbal lép kölcsönhatásba. Ez erősen korlátozza a sáv szélességet, vagyis az elérhető pásztázási szögtartományt. Hosszabb hullámhosszak esetén a jelenség fokozottan jelentkezik, ezért pl. infravörös lézerradar alkalmazásokban még a 90-es években is mechanikus, tükrös fényeltérítőket használtak, ami pl. helikopterre vagy repülőgépre szerelt változatban számos stabilitási és megbízhatósági problémát vet fel. Nd:YAG lézeres megmunkálás esetén pedig a folyamatosan pásztázó, tükrös megoldások nem biztosítják az egyes megmunkálási pontok közvetlen elérését [3.74]

Célkitűzés: Annak vizsgálata, hogy a TeO_2 kölcsönhatási közeg kristálytani szimmetriája felhasználásával lehetőség van-e egyetlen kristályban 1 μm vagy ennél hosszabb hullámhosszakon a kétirányú eltérítés megvalósítására minimum 50x50 pont optikai felbontás és 40% diffrakciós hatásfok mellett (lézer radar illetve mikromegmunkáló alkalmazásokra).

2.3 Gyorsan változó frekvenciájú (a véletlenszerű frekvencia-váltás periódusa tipikusan 5 msec) kommunikációs rendszerekben az elektromágneses hullámok irányának és frekvenciájának meghatározása 100 %-hoz közeli találati valószínűséggel hagyományos elektronikus módszerekkel nem, vagy csak jelentős számú párhuzamos rendszerrel oldható

meg. Több elemű antennasor, többcsatornás AO fényeltérítő és detektormátrix alkalmazásával radar frekvenciatartományban (1-4 GHz) a feladat megoldására elméleti javaslatokat korábban már publikáltak [3.43], [3.75].

Célkitűzés: Akusztó-optikai elvű rendszer kidolgozása és kísérleti vizsgálata a 100 MHz alatti RF tartományokra. Feladat a 100 KHz frekvencia és 2^0 iránypontosság elérése.

2.4 Fázisvezérelt (mechanikusan pásztázó elemeket nem tartalmazó) radar antennák esetén széles frekvencia tartományban szükség van impulzusok szabályozott (vezérelhető) időbeli késleltetésére. A probléma fáziskésleltetéssel a rövid radar impulzusok széles spektruma miatt nem megoldható. A vezérelhető elektronikus időkésleltetés megvalósítása bonyolult, párhuzamos rendszereket igényel. Ismert, hogy az impulzus spektrális felbontása, a frekvencia komponensek egyedi, kis lépésekben változó késleltetése majd újraegyesítése elvileg jelentős „true-time” (időbeli) késleltetést eredményezhet [3.52],[3.76].

Célkitűzés: Az elv optikai megvalósíthatóságának vizsgálata, az elérhető paraméterek meghatározása.

2.5 A jelenlegi fénycsövekben a fénycső falán található fénypor, ami a látható tartományban sugárzó fluoreszcens bevonat, gerjesztésére a higany 250 nm-es UV vonalát használják. Ezért a higany minden fénycsőben, ha csak kis mennyiségben is (4 mg) megtalálható. Ez az egészségre ártalmas, veszélyes anyag, hosszú távon az elektronikai termékekben használata várhatóan nem tartható fenn. Ismert, hogy tisztán xenon gázkisülésben UV vonalak jó hatásfokkal gerjeszthetők dielektromosan gátolt (szigetelt) elektróda elrendezéssel [3.61], [3.77].

Célkitűzés: Olyan lámpakonstrukció kidolgozása, amelyben a henger szimmetrikusan végigfutó szigetelt elektródák távolsága elegendően kicsi a gyújtási feszültség mérsékelt (500 - 800 V) tartományon belül tartása érdekében. Egyidejűleg a szerkezet a kisülés fenntartásához szükséges 10 - 50 nsec elektromos impulzusok fogadására legyen alkalmas, miközben a hétköznapi használathoz szükséges fénykibocsátással, kisülési térfogattal rendelkezzen, a jelenlegi kompakt fénycsövekkel versenyképes hatásfok (60-70 lm/W) megtartása, vagy meghaladása mellett.

2.6.1 A jelenleg használt 100 - 400 mm NYHL (nyomtatott huzalozású lemez) méretek és a vizsgálathoz szükséges minimum 25 μ m-es felbontás mellett az SMT (felületszerelési) folyamatok eredményének automatikus optikai vizsgálata csak sokkamerás (8-16 db) rendszerekben, a kamerarendszer vagy a szerelt lemez nagypontosságú, vezérelt mozgatásával oldható meg. A modern gyártósorok kapacitása a 10-20 nyomtatott huzalozású lemez/perc sebesség mellett több száz beültetett alkatrész és több ezer forrasztási és egyéb (jelenlét, pozíció pontosság, polaritás stb) vizsgálatot igényel. A nagy mozgási távolságok (100 - 500 mm) és tömegek (1 - 50 kg) miatt a teljes vizsgálat ideje sokszor jelentősen meghaladja a gyártósor ciklusidejét, a berendezések teljes tömege pedig akár az 500 kg-ot. A sebesség problémát jelenleg a vizsgálóberendezések

párhuzamosításával (egyidejűleg 2 - 4 berendezés végez azonos feladatokat) oldják meg [3.78-79].

Célkitűzés: A nyomtatott huzalozású lemezek szállítása során, a mozgó lemezeiről készült megfelelő felbontású videofelvétel a sokkamerás rendszerekkel készített felvételekkel azonos információtartalommal rendelkezik. Cél olyan eljárás kidolgozása és alkalmazhatóságának kísérleti igazolása, amellyel mozgó elemek nélkül, a videofelvételről leválogatott képek segítségével a vizsgálati feladatok megoldhatóak. Ez hosszú távon a berendezések egyszerűsödéséhez, a vizsgálatokhoz szükséges idő csökkenéséhez vezethet.

2.6.2 Az optikai vizsgálat elektronikai iparban jelenleg elvárt megbízhatóságát jól jellemzi, hogy a megengedett pszeudo (ál) hibák a 100 ppm, az átcsúszások (fel nem ismert hibák) a 10 ppm nagyságrendjébe esnek. A vizsgálat megbízhatóságát alapvetően meghatározó megvilágítás beállítás viszont szemrevételezéssel és próbálkozással (persze jelentős hardver és szoftvertámogatással), de egyedileg történik [3.80-81].

Célkitűzés: A vizsgálandó szerelt nyomtatott huzalozású lemezek és a vizsgálatokhoz tartozó megvilágítások virtuális modelljének létrehozásával automatikus beállítás optimalizáló eljárás kidolgozása és annak kísérleti igazolása, hogy a legnagyobb megbízhatóságot adó beállítások így módon meghatározhatóak.

3. Új tudományos eredmények

3.1. Akusztó-optikai Q-kapcsoló

Rezonátoron belüli alkalmazások során az akusztó-optikai eszközök elektronikusan vezérelhető optikai veszteségként működnek. A diffraktált nyaláb, eltérő terjedési iránya következtében kilép az optikai rezonátorból. A Q kapcsolásnak illetve a „mode-locking” folyamatának is az a feltétele, hogy a diffrakciós határfok, vagyis az eszköz vesztesége legyen nagyobb, mint a rezonátor körbejárási (round-trip) veszteségének és az erősítés szorzatának a négyzetgyöke. Ez azt jelenti, hogy lézer működéshez tartozó küszöb erősítés környékén már kis diffrakciós határfok is elegendő lehet, de nagyobb kimenő impulzus teljesítményekhez arányosan nagyobb határfok szükséges.

Az eszköz diffrakciós határfoka az (1.7) összefüggés alapján jól becsülhető. A kölcsönhatás szempontjából meghatározó M_2 jósági tényező a rezonátoron belüli alkalmazásokra az általánosan elterjedt kvarc esetében $1,56 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, míg TeO_2 -ra ez az érték $34,5 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$.

(1.7) alapján belátható, hogy azonos diffrakciós hatásfokhoz TeO_2 esetében 22-szer kisebb meghajtó teljesítmény, vagy 22-szer rövidebb kölcsönhatási hossz (kristály méret) szükséges, mint kvarcot használva. Hullámhosszban $\sqrt{22} = 4,7$ -szer hosszabb hullámhosszakon is teljesíthető a kvarc rövidebb hullámhosszakon mutatott diffrakciós hatásfoka.

Ilyen előnyök mellett csak a TeO_2 alapanyag optikai abszorpciója illetve optikai homogenitása lehet kérdéses, de a 350 nm – 5 μm transzmissziós tartományra már a nyolcvanas évek elején elérhetőek voltak megfelelő méretben TeO_2 egykristály öntecsek [3.30, 3.31].

Kézenfekvő volt ezeket az anyagokat a közeli infravörös hullámhosszakon működő lézerrendszerekben tesztelni.

A Technical University Berlin közreműködésével, H - J. Eichler professzor kezdeményezésére kifejlesztett eszközök a TeO_2 kristályban az izotróp akusztó-optikai konfigurációt, [001] irányú longitudinális akusztikus hullámokat és [110] irányú optikai hullámot használnak [3.16]. Az elérhető kölcsönhatási hossz technológiai okokból 40 mm volt, bőven elegendő a Q kapcsoláshoz illetve a stabil mode-lockinghoz szükséges minimum 25% diffrakciós hatásfok eléréséhez a közeli infravörös tartományban.



3.1.1. ábra TeO_2 kölcsönhatási közegű akusztó-optikai Q-kapcsoló

A 3.1.1 ábrán látható akusztó-optikai Q-kapcsoló abban különbözik a mode-locker kiviteltől, hogy az ultrahangkeltővel szemkötti oldala (a képen felül) ferdén lecsiszolásra került, az akusztikus állóhullámok kialakulásának megakadályozása érdekében. Mode-locker esetében a hátsó (esetünkben felső) felület párhuzamos, hiszen a rezonátor saját $c/2L$ (c – fényterjedés sebesség, L a rezonátor hossza) módusaihoz szinkronizált akusztikus állóhullámú működésre van szükségünk (ld. 1.1.8 ábra).

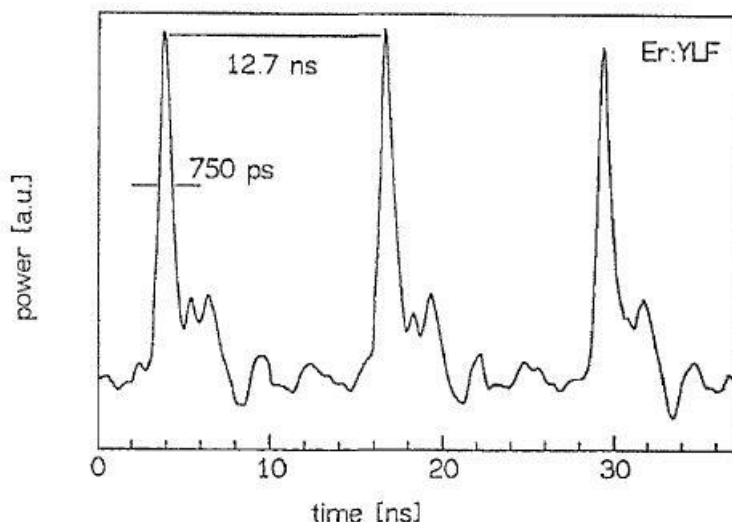


Fig. 2. Mode-locked pulse train of an Er:YLF laser in the center of a spike. The FWHM duration of the spike is 2.5 μ s.

3.1.2 ábra – TeO₂ mode-locker alkalmazásával demonstrált lézer impulzusok, [1.1] alapján

Az eszközt Er:YLF lézerrendszerben (lsd. 3.1.2 ábra) valamint Q-kapcsolóként Er:YSSG lézerben is teszteltük (lsd. 3.1.3 ábra).

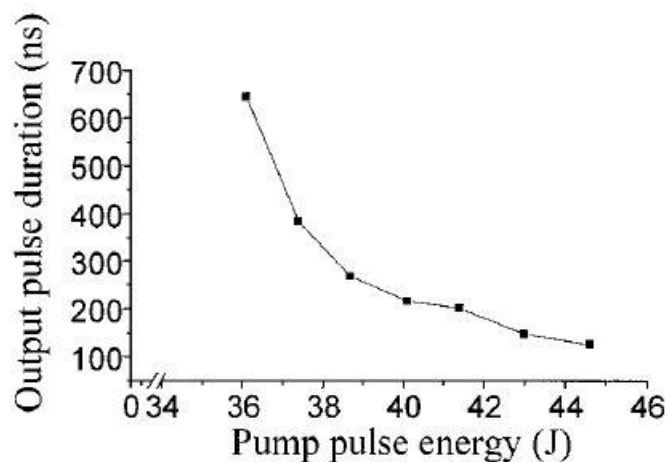


Fig. 6. Variation of the Q-switched pulse duration with the pump pulse energy. We created the curve in a resonator configuration with the Al₂O₃ output mirror by adjusting the delay time to the optimal delay time for each pump level.

3.1.3 ábra – Q-kapcsolt lézer impulzus hossz a pumpáló impulzus energia függvényében, [1.2] alapján

Az elért impulzus energia, impulzus hossz értékek, valamint a stabil lézerműködés igazolták 2.1 szerinti elvárásainkat.

TÉZIS

Bizonyítottam, hogy a TeO_2 kölcsönhatási közegű, nagyhatásfokú akusztó-optikai Q-kapcsolók és módus csatolók a 2-3 μm infravörös hullámhossz tartományban működő lézerrezonátorokban alkalmazhatók. Ebben a hullámhossz sávban a sugárzást a víz már elnyeli, ezért ezek a lézerek orvosi beavatkozásokra előnyösek.

Az akusztó-optikai eszközök diffrakciós hatásfoka az optikai hullámhossz négyzetével fordítottan arányos, vagyis a növekvő hullámhosszak felé erősen csökken. Hosszabb hullámhosszokon a TeO_2 kölcsönhatási közeg a rezonátor Q kapcsolásához illetve mode-locking-jához elegendő diffrakciós hatásfokot teljesít, ezért hiányt pótol a 2-3 μm hullámhossz tartományban működő lézeralkalmazásokhoz [1.1], [1.2].

3.2. Monoblokk, 2D infravörös akusztó-optikai fényeltérítő

Egyetlen cellából kialakított kétdimenziós akusztó-optikai fényeltérítőt a TeO_2 kölcsönhatási közeg anizotróp konfigurációjában készíthetünk. Ebben az esetben a TeO_2 optikai tengelye mentén mutatott optikai aktivitásából származó kis ordinárius és extraordinárius törésmutató különbséget használjuk ki.

Az optimális sávközépi akusztikus frekvencia az (1.11) összefüggés alapján határozható meg, és a hullámhosszal fordítottan arányos. 1064 nm-en 15,4 MHz, 632 nm-en 37,4 MHz míg 488 nm-es hullámhosszon 63,3 MHz [3.16].

A kölcsönhatási geometria foton-fonon kölcsönhatásban, hullámszám vektorokkal felírva a momentum megmaradás feltételét a 3.2.1 ábrán látható.

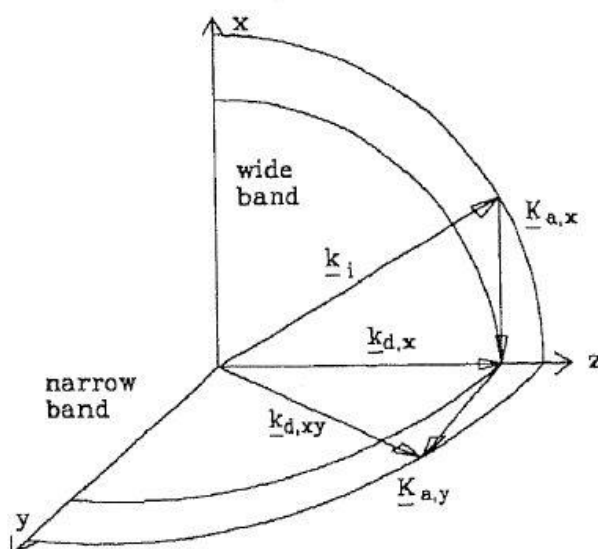


Figure 1 The wave-vector geometry of the anisotropic 2D interaction in TeO_2 .

3.2.1 ábra – Kétdimenziós anizotróp akusztó-optikai kölcsönhatás geometriája az (1.11) összefüggés szerinti optimális frekvencián [1.3] alapján

A belépő \mathbf{k}_i cirkulárisan polarizált extraordinárius nyaláb az X-Z síkban kis szöget zár be a [001] irányú Z tengellyel. Ezt a nyalábot egy $-X$ irányú nyíró akusztikus hullám egy közel Z tengellyel párhuzamos $\mathbf{k}_{d,x}$ ordinárius nyalábbá diffraktálja. Az erre merőleges diffrakciót egy Y irányú szintén nyíró ultrahang valósítja meg, amely egy $\mathbf{k}_{d,xy}$ extraordinárius nyalábot hoz létre [3.82].

Az akusztó-optikai fényeltérítő optikai felbontása (1.17) és (1.18) alapján

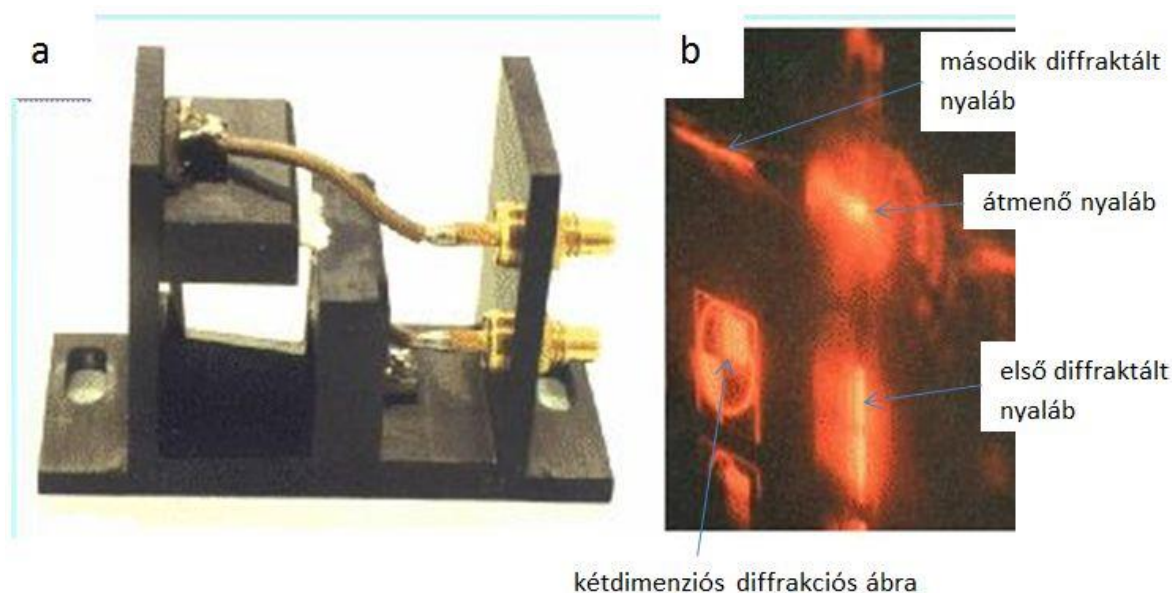
$$N = \frac{D}{\lambda} \Delta f$$

ahol N – a megkülönböztethető pontok száma, D - a cella optikai apertúrája, λ – a hangterjedés sebessége, Δf pedig a cella RF sávszélessége.

Az optikai felbontás tehát egyenesen arányos az abszolút RF sávszélességgel, ami viszont az optimális sávközép (1.11) összefüggésen keresztül fordítottan arányos a hullámhosszal.

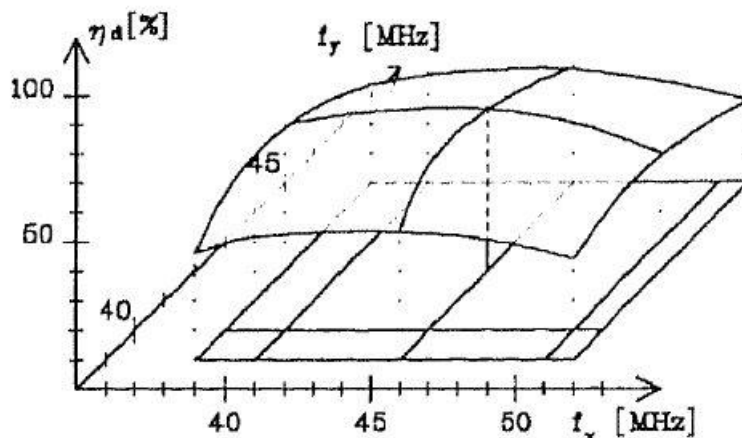
Hogyan lehet nagy optikai felbontást elérni két dimenzióban $1\ \mu\text{m}$ hullámhosszon, ahol az optimális sávközép 15,4 MHz lenne? A kérdést úgy is feltehetjük, mennyivel térhetünk el az optimális sávközépi frekvenciától ahhoz, hogy két dimenzióban a maximális RF sávszélességet kapjuk és a diffrakciós határfokunk is elfogadható maradjon.

Az optikai tengelytől kiforgatott 2D kölcsönhatás elméleti modellje 1996-ban még nem állt rendelkezésre, azt csak 1999-ben publikáltuk [1.12], ezért a kérdést csak kísérletileg tudtuk megválaszolni.



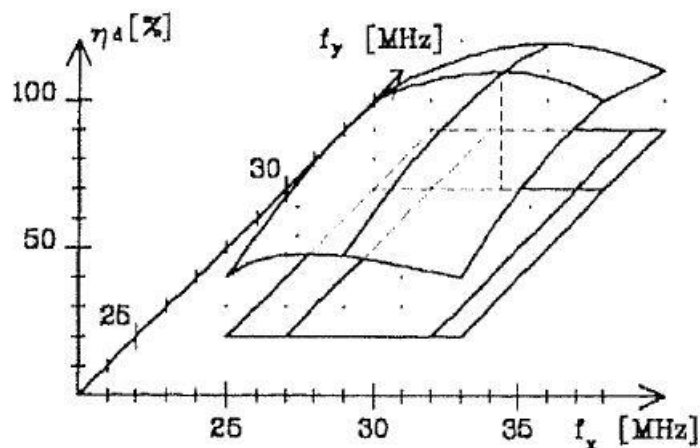
3.2.2 ábra – a) Monoblokk kétdimenziós TeO_2 fényeltérítő és b) diffrakciós képe

A 3.2.2 ábra szerinti fénytérítő felhasználásával a következő diffrakciós hatásfok-frekvencia karakterisztikákat mértem 633 nm-es hullámhosszra (3.2.3 ábra)



3.2.3 ábra –Diffrakciós hatásfok 633 nm-es hullámhosszra [1.3]

illetve 1064 nm-re (3.2.4 ábra).



3.2.4 ábra – Diffrakciós hatásfok 1064 nm-es hullámhosszra [1.3]

A maximális mért hatásfokok 50 illetve 40% voltak, a félértéknél mért sávszélességek pedig 7x13 illetve 7x8 MHz voltak, amelyekből az 5 mm-es optikai apertúrát és a 8 μ sec D/v értéket figyelembe véve 56x104 illetve 56x64 pont felbontást kaptunk. Ha azt is figyelembe vesszük, hogy két dimenzióban a félértéknél mért sávszélesség 70%-nál mért egydimenziós esetnek felel meg, láthatjuk, hogy kísérletekkel igazolható volt, kiforgatással jelentősen növelhető a monoblokk eszköz 2D optikai felbontása.

Az 1064 nm-es hullámhosszra készített eszközök lézer erősítővel kombinálva is tesztelésre kerültek [1.11]. Az eredményekhez kapcsolódó további publikációk [2.29-2.31].

TÉZIS

Megmutattam, hogy a két-dimenziós, egycellás diffrakció szögfeltétele anizotróp kristályban a közeli infravörös tartományban is teljesíthető. Igazoltam, hogy az elérhető pásztázási szögtartomány szempontjából a működési frekvencia tartomány pontos megválasztása a meghatározó. Megvalósítottam TeO_2 kölcsönhatási közegű monoblokk 2D fényeltérítőt 1 μm hullámhosszra. Nd:YAG rendszerben teszteltem. Bizonyítottam, hogy $\geq 50 \times 50$ pont felbontás és $\geq 40\%$ maximális diffrakciós hatások elérhető [1.3].

3.3. RF iránymérő berendezés

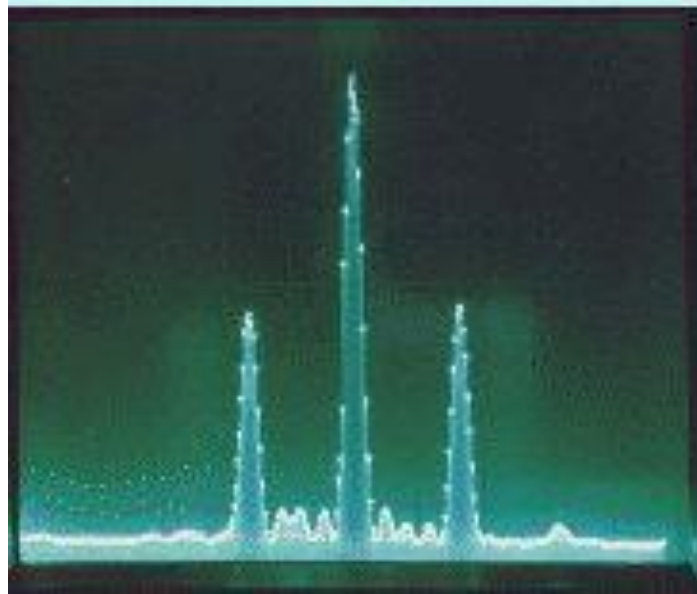
Az 1.4.4 ábra szerinti elrendezésben megépült kísérleti modell, ami egy rezgésmentesítő gumipogácsákra felfüggesztett alumínium öntvényben kialakított, párhuzamosan működő 30-60 és 60-90 MHz-es frekvencia tartományt lefedő optikai rendszer a 3.3.1 ábrán látható.



3.3.1 ábra – Az alumínium öntvényben, rezgésmentes kivitelben kialakított kísérleti optikai rendszer a 30-60 és 60-90 MHz-es frekvencia tartományra

A rendszer tervezésénél arra kellett törekedni, hogy az egyenletes antenna, illetve Bragg cella apertúra kiosztásnak megfelelő diffrakciós intenzitás eloszlásban (3.3.2 ábra) az első

dc_779_13



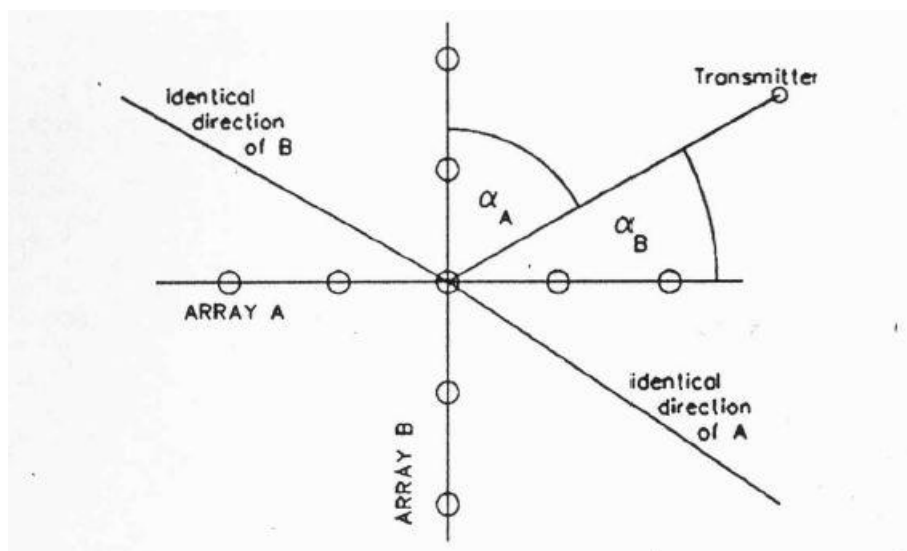
3.3.2 ábra – Diffraktált nyaláb intenzitás eloszlás az irány/fázismérés tengely mentén

diffraktált oldal maximumok nagyobb távolságra kerüljenek, mint a $\pm 45^\circ$ beesési szöghöz tartozó főmaximum elmozdulása [2.25]. A rendszer teszteléséhez szükséges 2 x 5 elemű antennarendszer a 3.3.3 ábrán, a kiértékelő szoftver által adott mérési eredmények a 3.3.6. ábrán láthatóak.



3.3.3 ábra - A rendszer 360°-os teszteléséhez szükséges antenna rendszer

Az egyértelmű irány meghatározás elve a következő [1.4]:



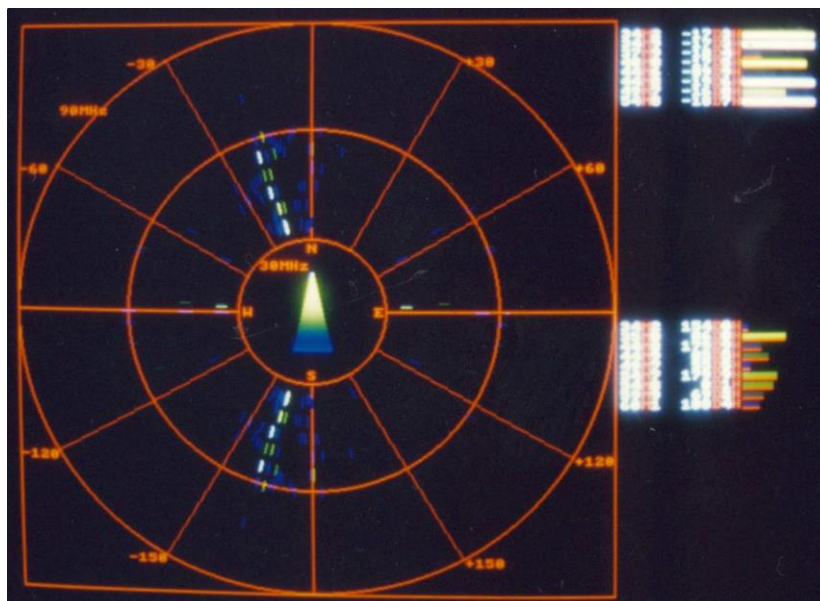
3.3.4 ábra – Lineáris antenna sor kétértelmű irány-fázis karakterisztikája [1.4] alapján

Az „A” antenna sor a 3.3.4 ábrának megfelelően egy tetszőleges helyen elhelyezett adó jelére az antennasor síkjára tükrözött irányra is azonos fáziskülönbséget és irányt mér. Viszont egy merőlegesen elhelyezett „B” antennasor esetében az azonos fáziskülönbséget jelentő második irány egy teljesen másik tér negyedbe esik, ezért az egyértelmű irány az alábbi, 3.3.5 táblázat segítségével minden esetben meghatározható.

α_A	α_B	α_{real}
$(-45^\circ) - (+45^\circ)$	$(-45^\circ) - (-90^\circ)$	α_A
$45^\circ - 90^\circ$	$(-45^\circ) - (+45^\circ)$	$90^\circ + \alpha_B$
$(-45^\circ) - (+45^\circ)$	$45^\circ - 90^\circ$	$180^\circ - \alpha_A$
$(-90^\circ) - (-45^\circ)$	$(-45^\circ) - (+45^\circ)$	$270^\circ - \alpha_B$

3.3.5 táblázat – Egyértelmű irány meghatározása merőleges antennasorok esetén [1.4]

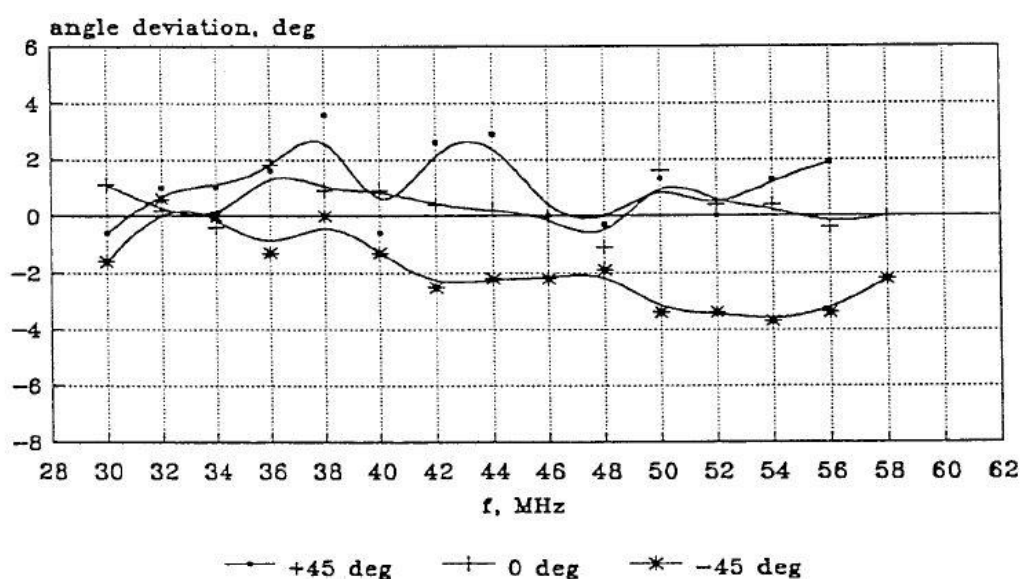
dc_779_13



3.3.6 ábra - Irány és frekvencia eredmények a 30-90 MHz, 0-360° mérési tartományban 5 ms RF impulzusok esetére

A 3.3.6 ábrán látható, egyetlen adóra kapott mérési eredmény éppen a 3.3.4 ábra szerinti szimmetrikus kétértelműséget mutatja, vagyis az elrendezéssel az egyértelmű irány meghatározás lehetséges.

Megmutattam, hogy a tereptárgyak a rendszer fázis-irány karakterisztikáját jelentősen befolyásolhatják, ezért egy adott helyszínen tesztmérésekkel végzett kalibráció szükséges [1.5]. A 3.3.7 ábra szerinti mért kalibrációs adatokkal korrigálva az eredményeket az iránymérés pontossága elérte a teljes tartományban elvárt 2 - 3°-ot.



3.3.7 ábra - Kalibrációs mérési eredmények a 30-60 MHz-es sávra, egy antennasorra

Az eredményekhez kapcsolódó további publikációk [2.27-28].

TÉZIS

Kidolgoztam és megvalósítottam a 30-90 MHz tartományban működő új, akusztó-optikai elvű RF irány- és frekvenciamérő berendezést. Terepmérésekkel végzett kalibrációval igazoltam, hogy merőleges antennasorok felhasználásával a rendszer 360 fok tartományban 2-3 fok pontossággal alkalmas RF hullámok irányának egyértelmű meghatározására [1.4], [1.5].

3.4. „True-time” akusztó-optikai késleltető vonal

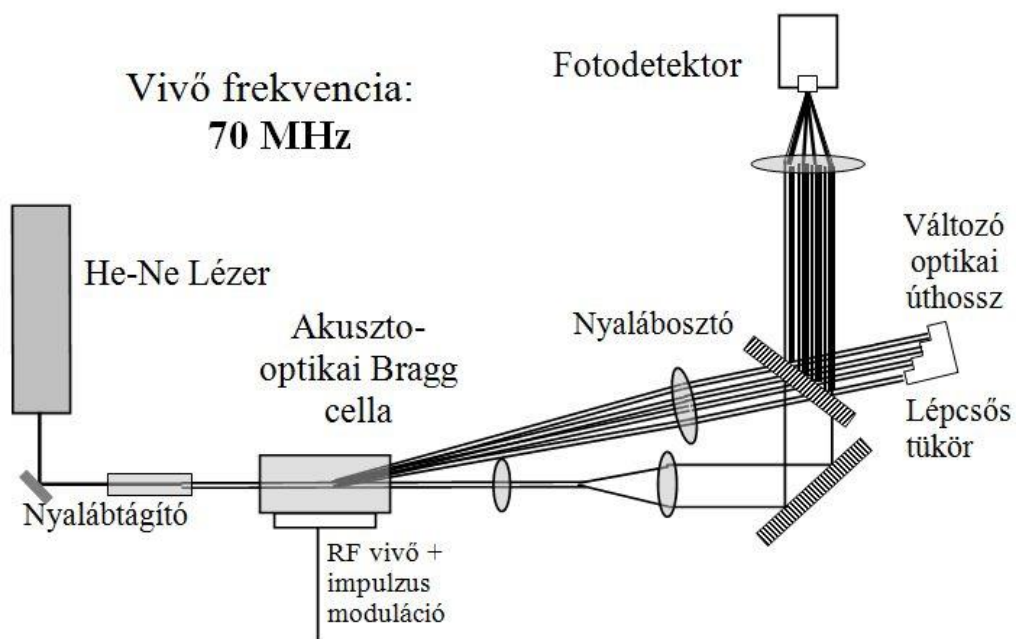
Az 1.5 fejezet (1.20) összefüggését leegyszerűsíthetjük, ha optikai frekvenciákon, frekvenciafüggő útkülönbséget akarunk megvalósítani.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{\Delta f} \quad (3.4.1)$$

ahol λ a fény hullámhossza, Δl az útkülönbség, Δf pedig az útkülönbséghez tartozó frekvenciaváltozás. Ez az úthossz diszperzió lényege, a rövid impulzus, térben szétválasztott frekvencia komponensei különböző utat tesznek meg, mielőtt újra egyesítenénk őket. A τ késleltetési idő pedig (3.4.1) alapján egyszerűen számolható.

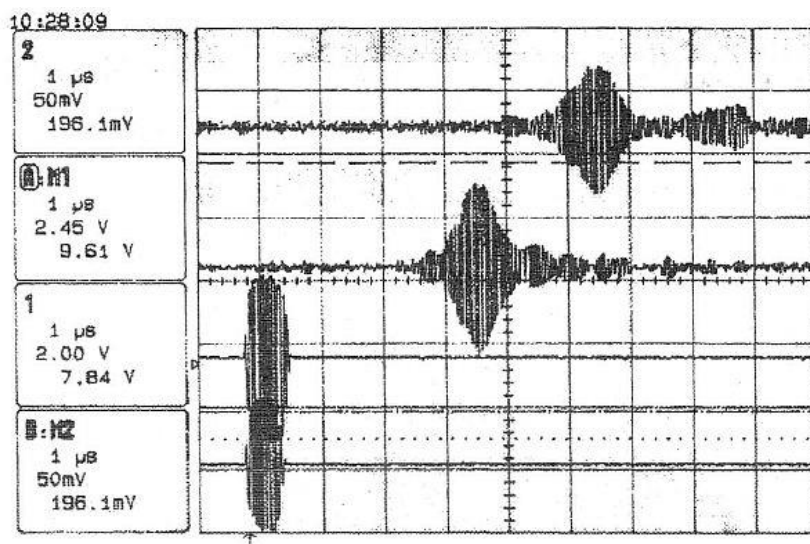
Egy anizotróp konfigurációjú, 70 MHz sávközépi frekvenciájú TeO_2 Bragg cella 1 mrad/MHz eltérítési szöggel diffraktál. 25 cm távolságban 0,25 mm/MHz térbeli szétválasztást érhetünk el vele. Egyszerű vákuumpárolgatott lépcsős tükörrel, ahol a lépcsők 0,25 mm szélesek és 600 nm magasak, az oda-vissza fényút miatt kétszeres, $\frac{\Delta l}{\Delta f} = 1,2 \mu\text{m/MHz}$ úthossz diszperzió adódik, amit (3.4.1) szerint elosztva a $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ optikai hullámhosszal 2 μsec időbeli késleltetést kapunk. Ez normál úthosszban $2 \mu\text{sec} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$ fényútnak felelne meg!

Az eddigiek alapján tehát az 1.5.2-es ábrán [3.52] javasolt elrendezés a 3.4.1 ábra szerint valósítható meg akusztó-optikai Bragg cellával.



3.4.1 ábra - A rendszer felépítése. Az úthosszkülönbséget vákuumpárolgatatott lépcsős tükör elrendezéssel szimuláltuk

A Bragg cella egyrészt elvégzi az RF meghajtó frekvencia optikai frekvencia sávra történő transzponálását, másrészt 1 mrad/MHz felbontása megfelelő az egyes frekvencia komponensek térbeli szétválasztására. A frekvencia komponensek közötti útkülönbséget az vákuum párolgatatott 600 nm magas tükör lépcsők hozzák létre.

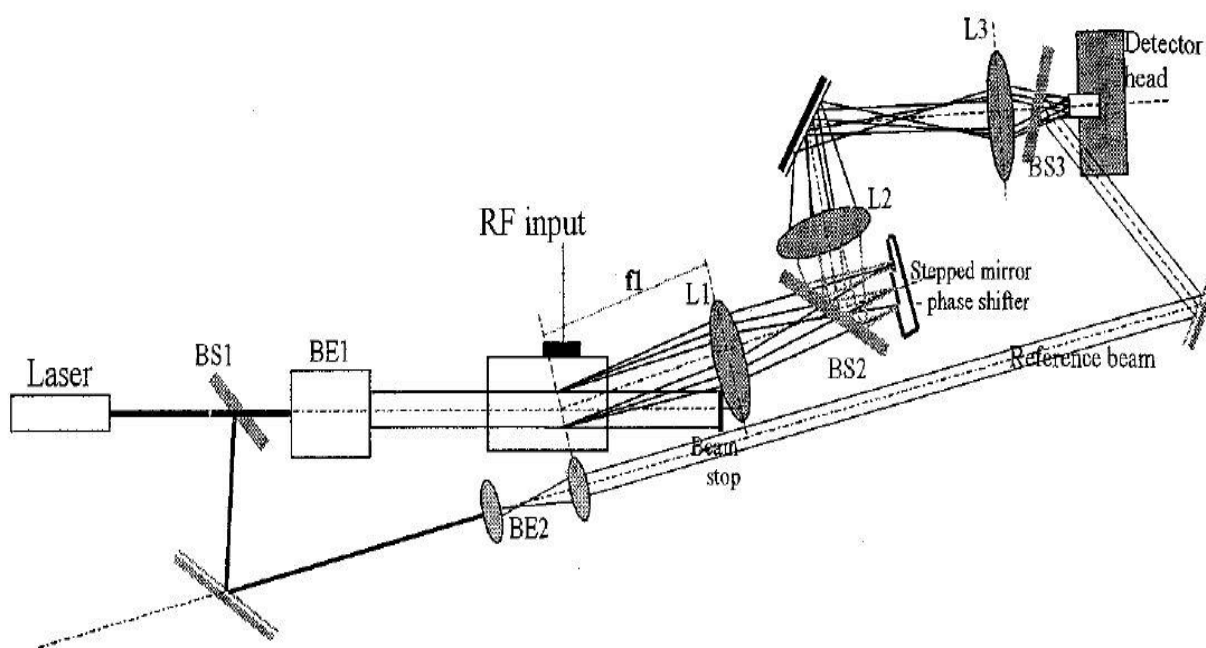


3.4.2 ábra - Oszilloszkóp képernyő (1 μsec/cm), bemenő impulzusok (1, B:M2), kijövő impulzus (A:M1), késleltetett impulzus (2). [1.6]

Ezen az elven, a 3.4.1 ábra rendszerével megvalósított, a korábban becsült 2 μsec késleltetést igazoló mérési eredmény a 3.4.2 ábrán látható. Vegyük észre, hogy bár késleltetési idő jól demonstrálható volt, de az impulzus alakhű átviteléhez a kimenő impulzus spektrális tulajdonságainak meghatározására, s rendszer további részletesebb vizsgálatára van szükség.

A 70 MHz-es vivőt moduláló 1 μsec hosszúságú impulzus a Bragg cellában egy 70 MHz-es frekvenciájú, 1 μsec időtartamú akusztikus hullámá alakul. Az akusztó-optikai diffrakció következtében létrehoz egy diffraktált nyalábbot. A diffraktált optikai nyaláb frekvenciája is megváltozik a jel, a vivő frekvenciájával (ld. 1.1.4 ábra). A belépő fénynyalábból kicsatolt, eredeti optikai frekvenciájú referencia „lokáloszcillátor” nyalábbal összekeverve a diffraktált nyalábot, az impulzus, mint egy amplitudó modulált 70 MHz-es jel, az optikai detektoron jelenik meg.

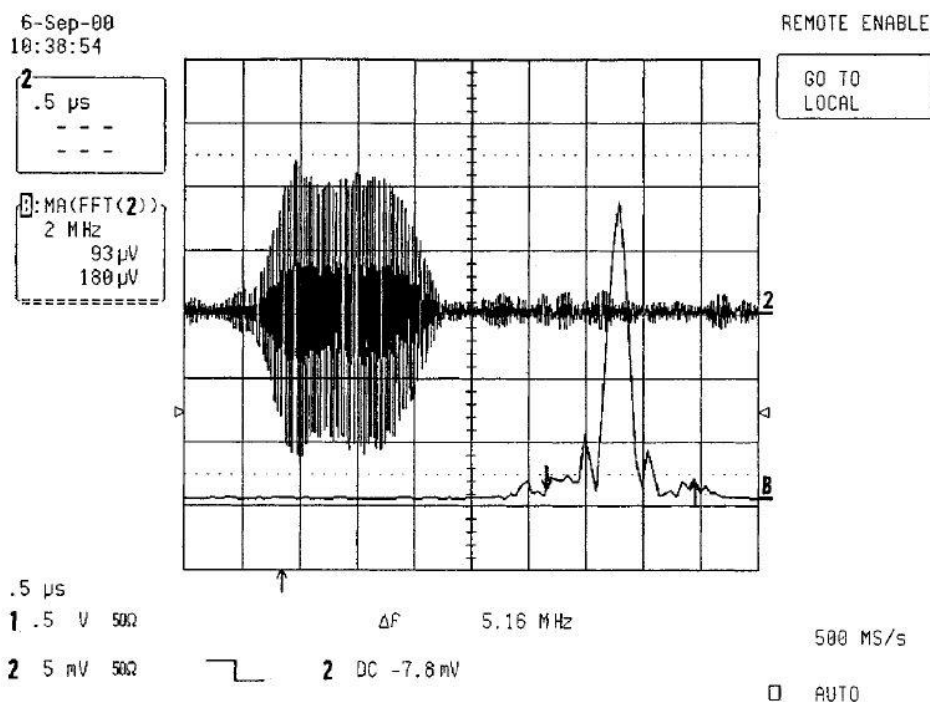
Az optikai heterodin detektálás feltétele, hogy egyrészt a detektoron valamennyi frekvenciakomponens jelen legyen, másrészt az, hogy az egyes nyalábok fázisfelületeinek, a fázisfelületek görbületi sugarainak illeszkedni kell [3.90]. A két feltételnek egyidejűleg kell teljesülni valamennyi frekvenciára és a referencia „lokáloszcillátor” nyalábra is a detektor teljes területén. Ezért az optikai rendszert a nagyobb átviteli sáv szélesség érdekében át kellett építeni a 3.4.3 ábra szerint.



3.4.3 ábra – „True-time” késleltető vonal optikai rendszere alakhű impulzus átvitelre optimalizálva [1.13]

A fázisfelületek illeszkedését legegyszerűbben sík fázisfrontokkal lehet megvalósítani. Gauss nyaláb esetén ez kétféle módon közelíthető. A referencianyaláb átmérőjét megnöveltük a fázisfelületek görbületi sugarának a növelése érdekében. A diffraktált nyalábokat pedig az L3

lencsével úgy képeztük a detektorra, hogy a detektor éppen a Gauss nyalábok „nyalábnyakának” síkjába kerüljön. Ez, a 3.4.3 ábra elrendezésében, valamennyi diffraktált frekvenciakomponensre sík fázisfelületeket eredményez.



3.4.4 ábra – Kimenő impulzus alakja (2) és spektruma (B) a 3.4.3 ábra elrendezésében mérve [1.13]

A rendszer részletes analízise és az optimális detektorméret meghatározása is [1.13]-ban megtalálható. A lépcsős tükör 180°-os megfordításával a frekvenciafüggő optikai útkülönbség előjele megfordul, ezért a kijövő impulzus az alap késleltetéshez képest korábban is ki tud lépni.

Az elrendezés megvalósítását elektromos vezérelhető LCD fázismodulátorral [1.14], illetve sokcsatornás elektrooptikai modulátorral [1.15] tartalmazza.

TÉZIS

Új optikai elrendezést dolgoztam ki RF impulzusok frekvencia független („true-time”), az úthossz diszperzió elvén alapuló késleltetésére akusztó-optikai Bragg cella alkalmazásával. A rendszer alkalmasságát mérésekkel bizonyítottam. Igazoltam, hogy néhányszor 100 nm fényútkülönbséggel akár 1 μs időbeli késleltetés érhető el impulzus kiszélesedés nélkül. [1.6]

3.5. DBD (dielectric barrier discharge) fluoreszcens fényforrás

3.5.1 Alapvető DBD fényforrás tervezési elvek

A higanymentes DBD fényforrások egyik előnye, hogy nincsenek bemelegedési jelenségeik. A hagyományos fénycsövekben a higany az alacsony nyomás ellenére is a lámpa kikapcsolt állapotában részben folyadék fázisban, néha akár kis cseppekben összegyűlve található. A lámpa bekapcsolása után a gázkisülés melegedésével a higany elpárolog és néhány perc alatt helyreáll a normális működéshez szükséges higanygőz koncentráció a kisülésben. Ezzel a jelenséggel higanymentes DBD kisülésben nem kell számolnunk.

A DBD fényforrás által kisugárzott fényteltjesítmény számítása lumenben kifejezve, a korábban említett irodalmi adatok alapján nagyon leegyszerűsíthető [2.26]

$$P_{ki}[lm] = a [konstans] P_{be} [W] V [cm^3] p [mbar] \quad (3.5.1)$$

A kimenő látható fény teljesítmény - P_{ki} , arányos a bemenő elektromos teljesítménnyel - P_{be} , és a gerjeszthető atomok számával, vagyis a V térfogattal és a p nyomással.

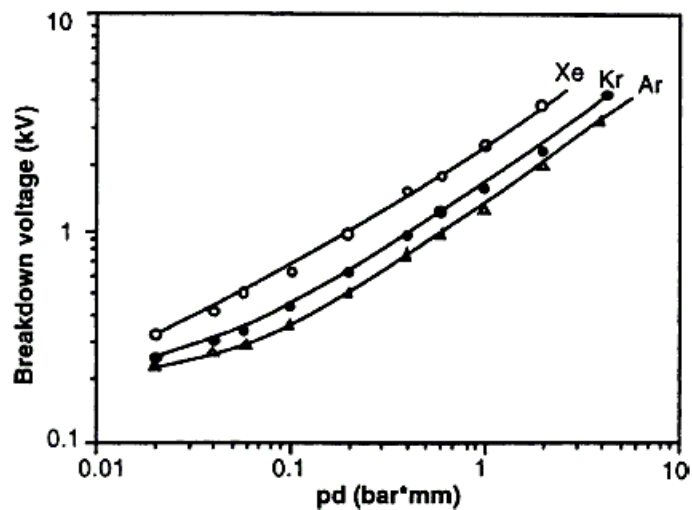
Egy adott kölcsönhatási konfigurációra (beleértve a geometriát és a felhasznált anyagokat) az a állandó meghatározható. Például a 20 W-os Osram Planon lámpára $V = 146 \text{ cm}^3$, $p = 100 \text{ mbar}$, a laboratóriumi vizsgálatok során 65 lm/W hatásfokot mértünk, így az a állandó 4,45 lm/mbar/cm³/W adódik.

A fényforrás hatásfoka fordítottan arányos a dielektrikum réteg vastagságával és arányos annak dielektromos állandójával [3.57]

$$\eta \left[\frac{lm}{W} \right] \sim \frac{\epsilon}{d_\epsilon} \quad (3.5.2)$$

Érthető, hogy a Planon lámpa (1.6.6 ábra) dielektromos szigetelő rétege csak 0,3 mm vastag és ólomüvegből készült, amelynek 9 a relatív permittivitása, szemben a Corning 7056 alkáli-boroszilikát üveg 5,7-es vagy a kvarc 3,8-as értékével.

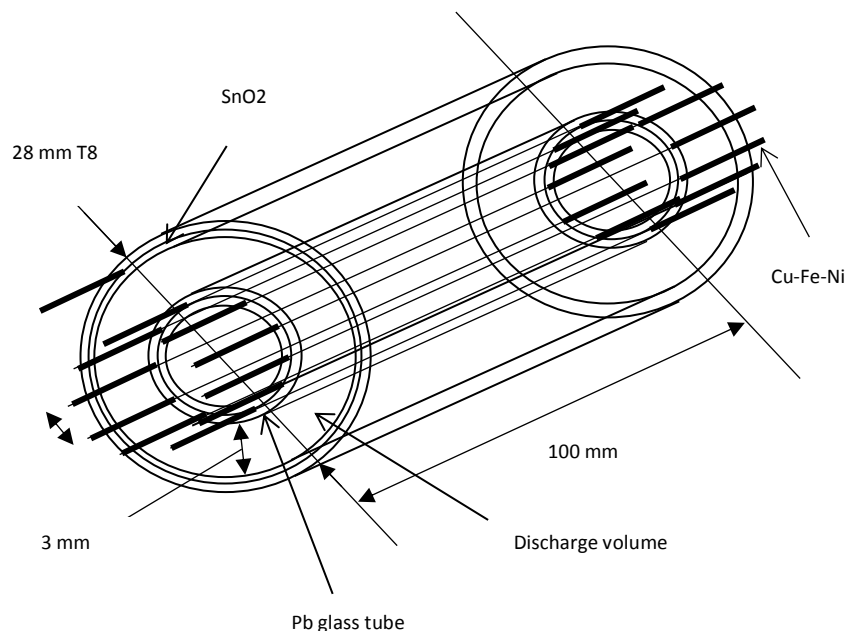
A gyújtási feszültség kapcsolatát a gáznyomás-elektrodátávolság szorzatával a Paschen törvény alapján kaphatjuk meg, ezt a kapcsolatot nemesgázokra a következő ábrán láthatjuk [3.84].



3.5.1. ábra – Különböző nemesgázok „gyújtási” (átütési) feszültsége a nyomás-elektrodatávolság szorzatának függvényében [3.84].

A szükséges meghajtó feszültség arányos az elektrodatávolsággal, az áram pedig a kisülés felületével. Annak érdekében, hogy a túl nagy (nagyobb, mint 1 kV) meghajtó feszültség értékeket elkerüljük, az elektrodatávolságot érdemes a néhány mm, a nyomást pedig 100 mbar nagyságrendjében tartani.

A cél a kompakt fénycsövek kiváltására alkalmas fényforrás-konstrukció kidolgozása volt, a kompakt fénycsövekhez hasonló teljesítmény és hatásfok paraméterekkel. Az első ilyen konstrukció [2.26] alapján a 3.5.2 ábrán látható.

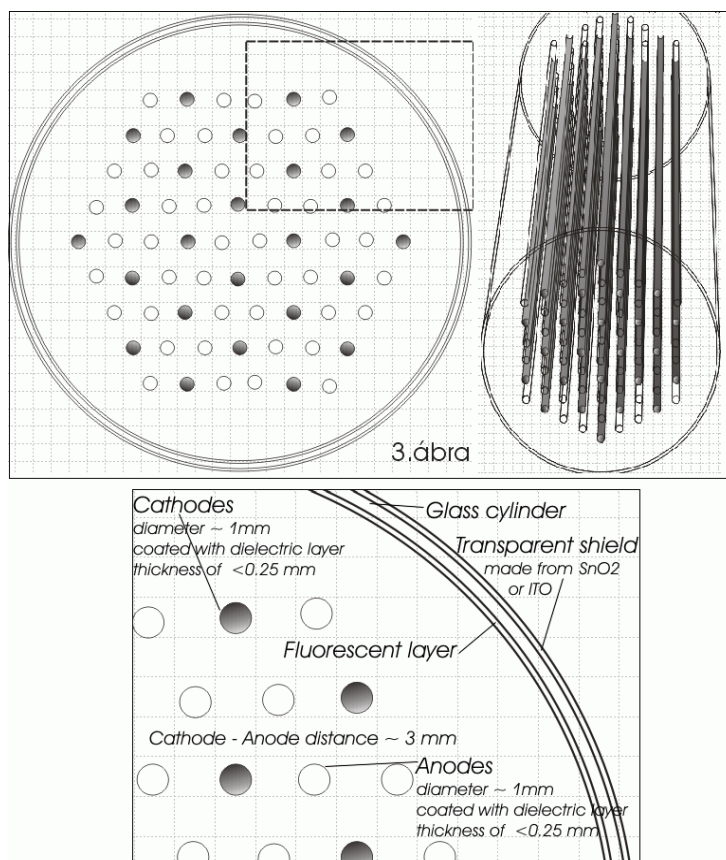


3.5.2 ábra Hengeres DBD lámpa konstrukció terve [2.26]

A belső Cu-Ni-Fe elektródákat fedő ólomüveg vastagságát a 0,2-0,3 mm tartományban érdemes tartani. A külső elektróda szerepét óndioxid vagy ITO átlátszó vezető réteg tölti be.

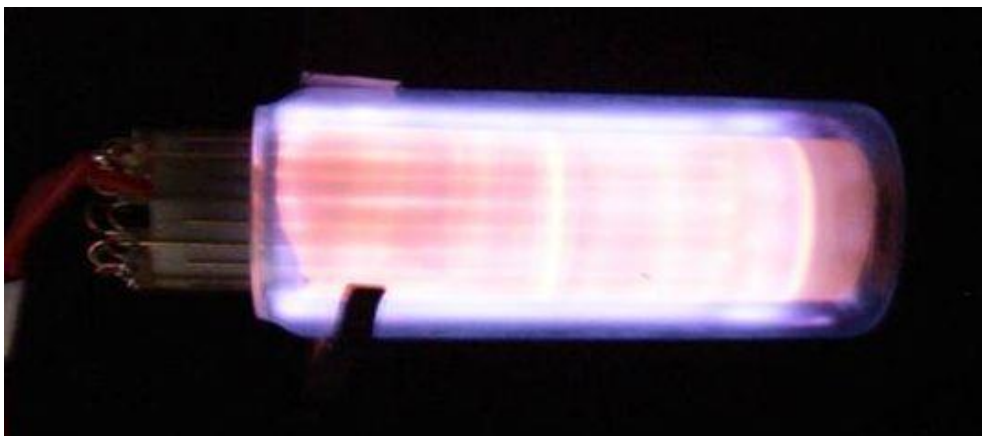
Az ábrának megfelelő méretekkel a kisülési térfogat $23,5 \text{ cm}^3$ -nek, a várható bemenő teljesítmény 3,2 W-nak, a hagyományos fluoreszcens bevonatokkal elérhető fényáram pedig 210 lm-re adódott. Így $210 \text{ lm}/3,2 \text{ W} = 65,7 \text{ lm/W}$, vagyis a kompakt fénycsövek jellemzőinek megfelelő minimum 60 lm/W hatásfok elérhetőnek tűnt [2.26].

A konstrukcióról európai illetve amerikai szabadalmi bejelentés is készült [1.7] (ld. 3.5.3 ábra).



3.5.3 ábra - Belső szigetelt elektródás lámpa felépítése [1.7] alapján

A fényforrás elkészítése és mérése számos egyéb problémát vetett fel. A hagyományos fénycsőgyártási technológiák nem alkalmasak 3.5.2 ábra szerinti szigetelt elektródás elrendezés előállítására. Ehhez hasonló, de közbenső megoldásként készült a 3.5.4 szerinti kísérleti lámpa, ahol az egyes elektródák között kerámia lapok biztosították a szigetelést. A további előrelépést a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Üvegtechnológia Laboratóriumában készült szigetelt belső elektródás fényforrások jelentették (3.5.5 ábra).



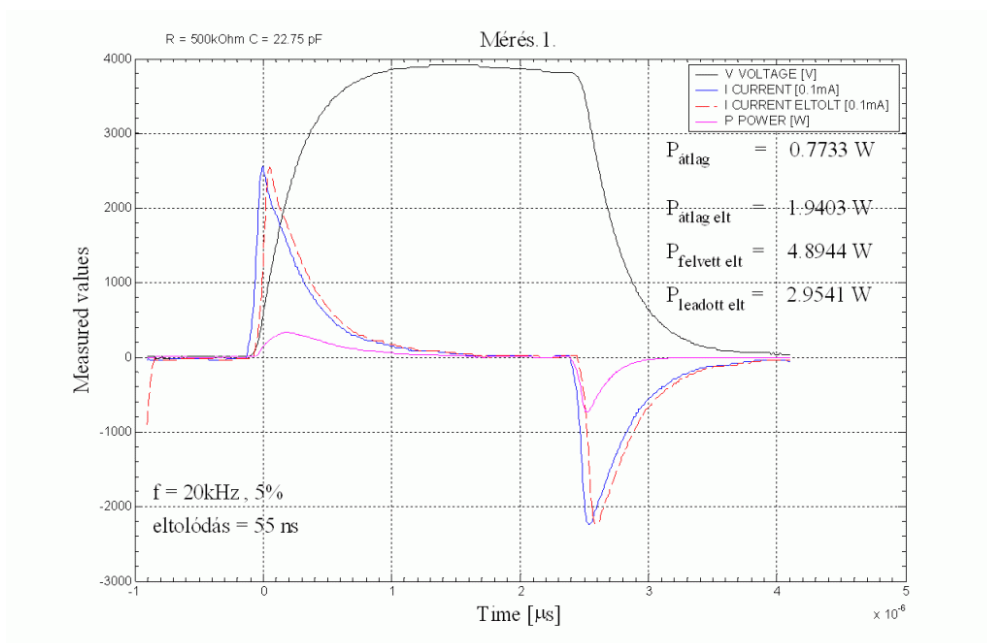
3.5.4 ábra - A General Electric kutató laboratóriumában megvalósított első kísérleti lámpa és a létrejövő gázkisülés képe, fluoreszcens bevonat nélkül



3.5.5 ábra - A BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Üvegtechnológia laborjában készült szigetelt belső elektródás kisülő lámpa konstrukció , fluoreszcens bevonat nélkül

A homogén kisülés eléréséhez rövid feszültség-impulzusokat kell előállítani [3.61]. A fényforrás által felvett, illetve leadott elektromos teljesítmény pontos meghatározása az impulzusok feszültség áram adataiból lehetséges.

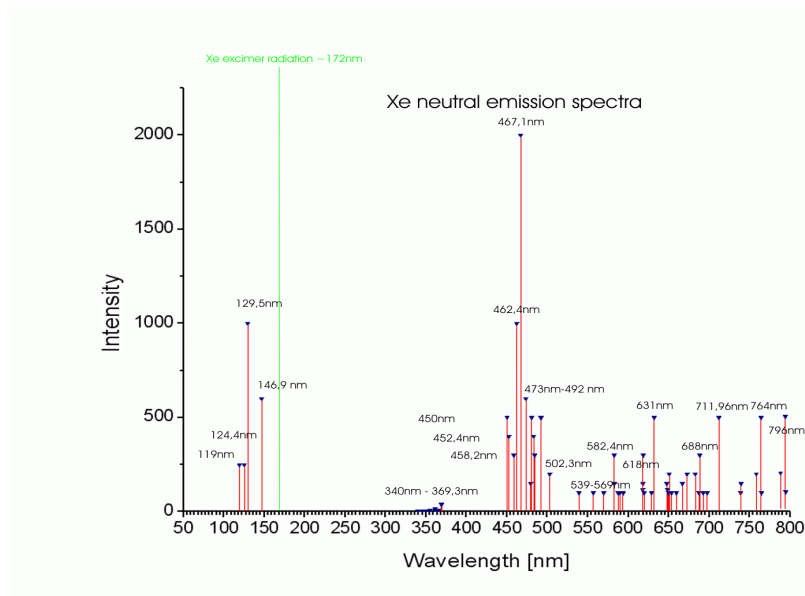
A következő, 3.5.6 ábrán tipikus meghajtó feszültség és áram görbéket láthatunk az idő függvényében. A mérési eredményről az is leolvasható, hogy az áram illetve feszültség értékek mintavételezése között akár csak 55 nsec eltérés is már akár 1 W hibát okoz a mért elektromos teljesítményben ($P_{\text{átlag}}$ és $P_{\text{átlag elt}}$). A pontos teljesítménymérést analóg szorzással valósítottuk meg.



3.5.6 ábra Meghajtó feszültség és áram jelalakok, valamint az ezek alapján számolt teljesítmény felvétel értékek

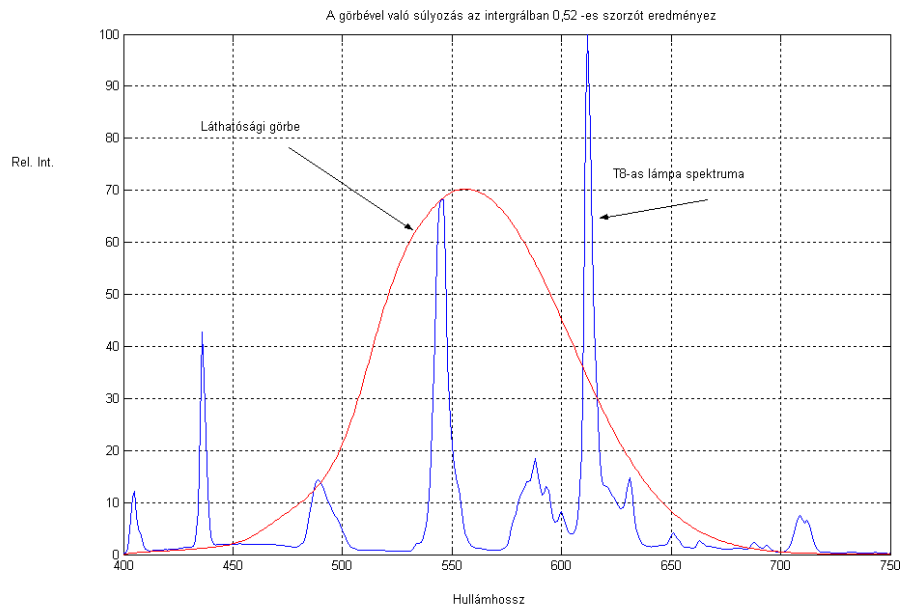
Különleges probléma, hogyan igazoljuk, hogy a jellemzően higanyt tartalmazó technológiára felépített laboratóriumban (ahol egyébként hagyományos elvű kisnyomású fluoreszcens kísérleti lámpák is készültek) az előállított fényforrás még nyomokban sem tartalmaz higanyt.

A higanymentesség bizonyítása a kisülések spektrális tulajdonságai alapján történt. A Xe gáz (ld. 3.5.7 ábra) illetve a normál fénycső (3.5.8 ábra) spektrális tulajdonságai jelentősen eltérnek, s éppen azon a 435 nm-es hullámhosszon, ahol az egyiknek jellemző maximuma, a másiknak minimuma van (3.5.9 kép).

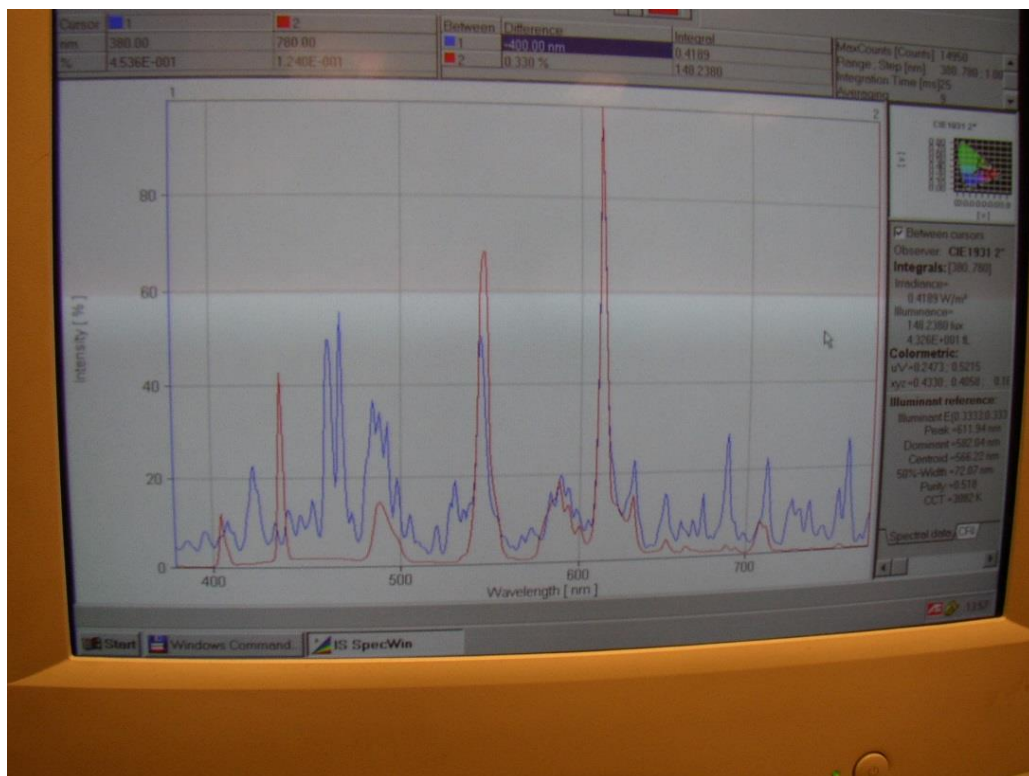


3.5.7 - ábra Xenon gázkisülés spektruma

dc_779_13



3.5.8 ábra - Normál T8 fénycső spektruma



3.5.9 kép - Normál T8 fénycső mért spektruma (piros görbe) és az új Xe DBD lámpa spektruma (kék görbe). Jellemző eltérés 435 nm környékén az intenzív Hg vonal.

A kísérleti fényforrások fényáramának mérésére egy nagyméretű, integráló (Ulbricht) gömbben került sor, amelyet etalon fényforrással kalibrálni kellett. A kísérleti lámpák megfelelő flintüveg alkalmazásával reprodukálhatóan 60 lm/W hatásfok felett teljesítettek [1.8], így a konstrukció kísérletekkel is bizonyíthatóan teljesítette a kutatási célkitűzéseket.

TÉZIS

Kidolgoztam új, xenon gázkisülést tartalmazó, higanymentes, belső elektródás DBD (dielectric barrier discharge) elvű fluoreszcens fényforrás konstrukciót [1.7] és közreműködtem annak működést igazoló megvalósításában. A fényforrással ≥ 60 lm/W hatásfok érhető el, bemelegedési jelenségek nélkül [1.8].

3.6 Automatikus optikai vizsgáló berendezések

3.6.1 Új, kísérleti vizsgálóberendezések gyártósori alkalmazásokra

Az elektronikai gyártásban elvárható megbízható vizsgálatokhoz ma elterjedten, a jelenlegi alkatrész méretekhez illeszkedően 25 μm -es optikai felbontással készülnek képek [3.68]. Egy átlagos 1000 x 760 pixelt tartalmazó szürkeárnyaltos, megapixeles kamera (3.6.9 kép) így 25 x 19 mm^2 -es területet lát, ami a töredéke a vizsgálandó, sokszor néhányszor 100 mm-es dimenziójú, több száz elemet tartalmazó nyomtatott huzalozású lemezek méretének.

A felvételek elkészítéséhez a lemezt, vagy a megvilágító és kamera rendszert mozgatni kell, nagy pontossággal, a vizsgálat sokszor néhányszor tíz másodperces idejének csökkentése csak a kamerák számának növelésével lehetséges.

A megoldás, hogy egyszerű, álló helyzetben készített képek helyett a kamera vagy a lemez mozgása közben készített video felvételtől válogassuk le a számunkra szükséges képi információkat, ezzel csökkentve a vizsgálat idejét, kézenfekvőnek tűnik. Sőt, transzporter (a nyomtatott huzalozású lemezt továbbító) egységre szerelt video rendszerrel esetleg a teljes mozgatás kiválthatóvá válik.

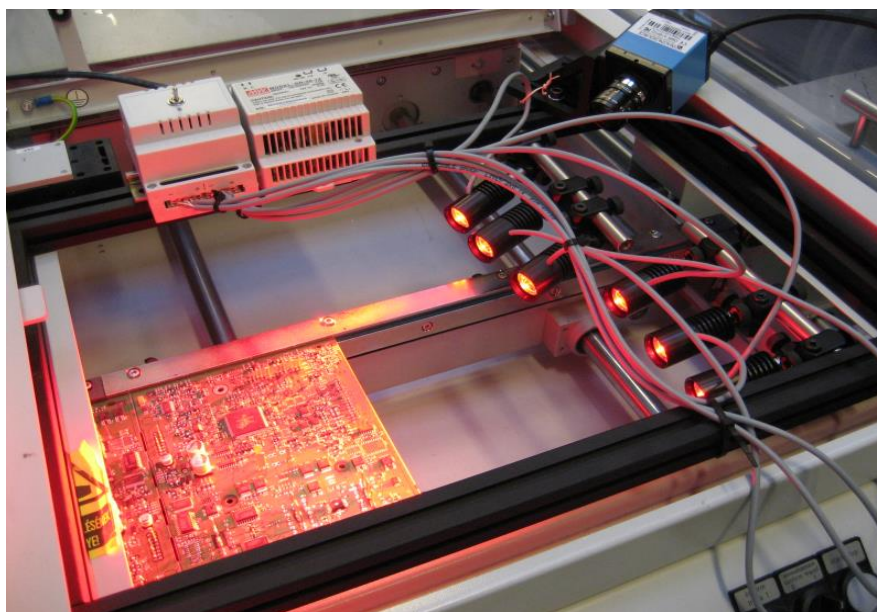
Mozgó elemekről éles képeket tartalmazó video felvétel készítésének feltétele, hogy az egyes képkockák expozíciós ideje alatt a vizsgált objektum a kép felbontásánál kisebb mértékben mozduljon el. 50 mm/sec lemez sebesség mellett, max. 5 μm elmozdulást engedélyezve (ez a felbontás ötöde) 100 μsec expozíciós idő adódik, ami a töredéke a szabványos 25 frame/sec felvételhez tartozó 40 msec-nek.

Ipari kivitelű, külső vezérlésű CCD kamerákkal (lsd. 3.6.7 ábra) készíthetők ilyen felvételek, bár az expozíciós idővel fordítottan arányosan, a hagyományos felvételnél 400-szor erősebb megvilágítás, több fény szükséges hozzá.

Kísérleteinkben egyenként 3 W teljesítményű, Luxeon típusú RGB (piros, zöld és kék) LED fényforrásokat használtunk, 3 x 3-as elrendezésben. Ez akár 18 W fényforrás-teljesítményt jelent egy jól kezelhető 10x10 mm² területen, ami jelentősen meghaladja az általánosan használt megvilágító rendszerekkel elérhető fényességet.

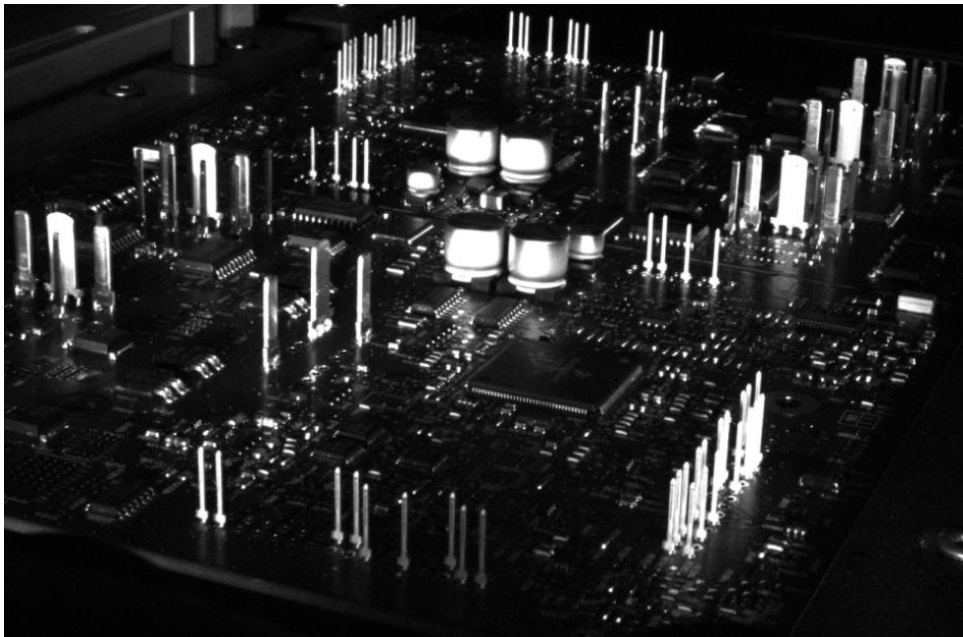
3.6.1.1. „Pin” vizsgáló berendezés

A feladat vezetőtüske-beültető berendezést követő lemezmozgató transzporter egységen a beültetett pin-ek jelenlétének gyors ellenőrzése volt.



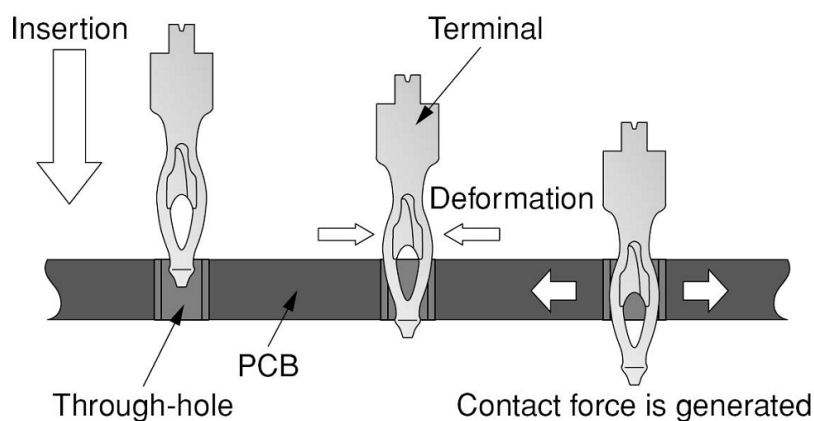
3.6.1 ábra Átvezető tűskékkel (pin-ek) szerelt nyomtatott huzalozású lemez képe, nagyteljesítményű LED megvilágítással és video kamerával.

A 3.6.1 ábrán egy kísérleti elrendezés látható, 6 db 3 W teljesítményű piros LED fényforrással, ferde kamerás elrendezéssel, a készített video felvételtől a 3.6.2 ábrának megfelelő képek válogathatók le.



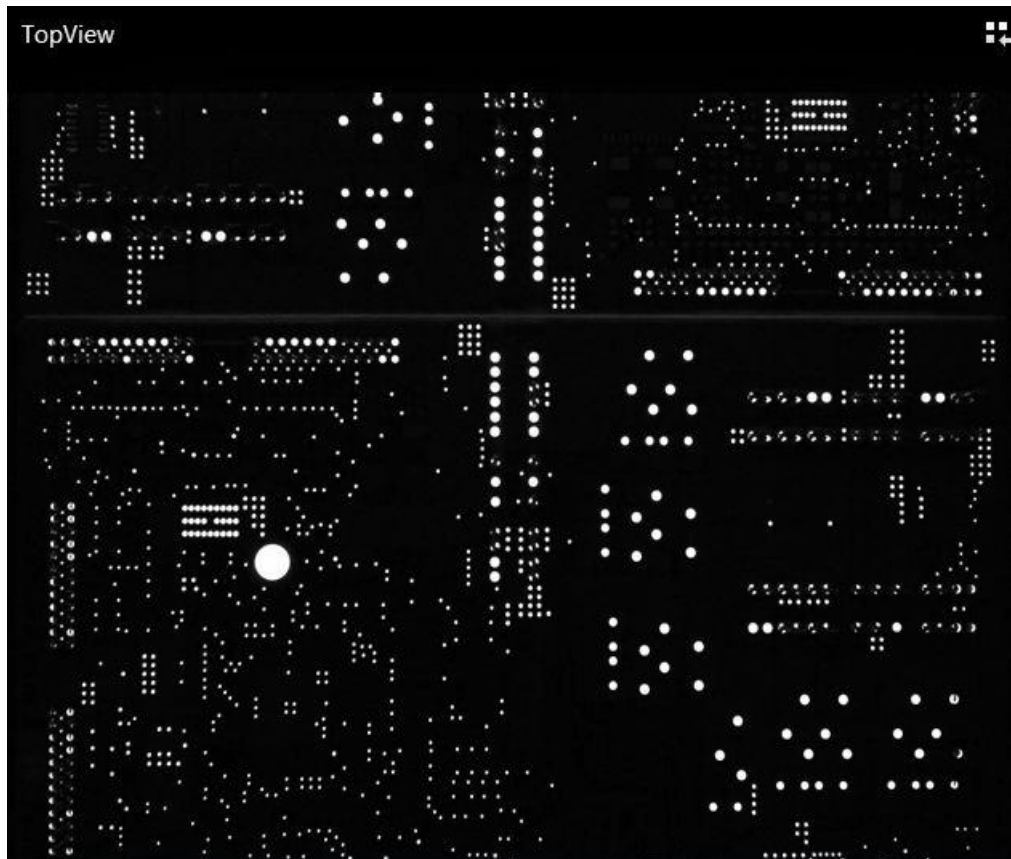
3.6.2 ábra- A 3.6.1 kép elrendezésében készült video felvétel egy képkockája

A vizsgált terület nagy mérete (a nyomtatott huzalozású lemez egyharmada) miatt a felvételen a tűskék képének kontrasztja nem elegendő a megbízható ellenőrzéshez. Bizonyos területeken a tűskék megvilágítása sem megfelelő. Ezért egyszerűsítettünk a koncepciót, és egy alulvilágító, merőleges CCD kamerás elrendezésben, csak a 3.6.3 ábra szerinti tűskék helyét vizsgáljuk, ami tűske hiányában egy fényes folt. A beültetett tűske az alsó megvilágítás nagy részét kitakarja, ami erős kontrasztot eredményez (3.6.4 és 3.6.5 kép) [1.9]

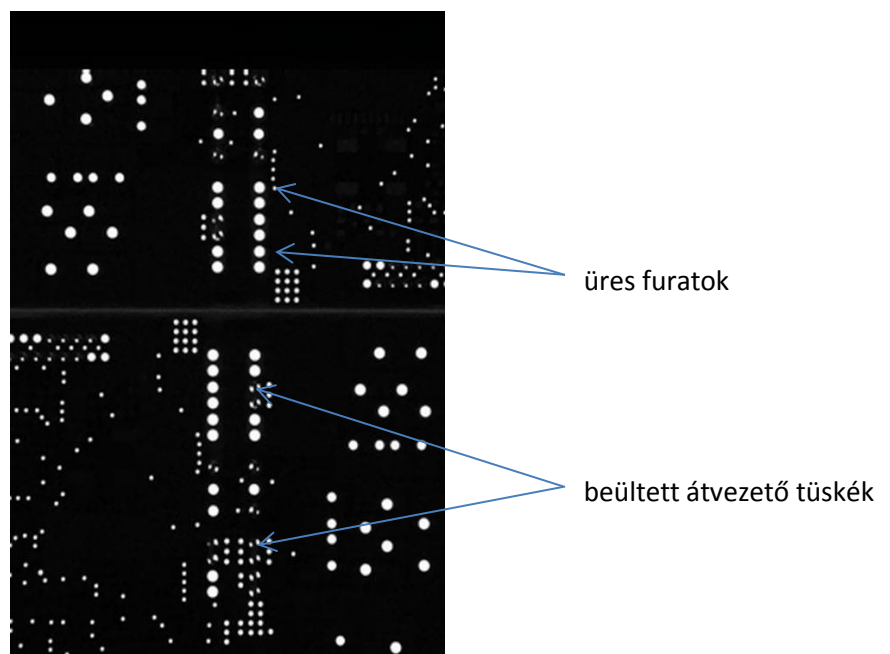


3.6.3 ábra – Az átvezető tűske beültetésének folyamata [1.9]

dc_779_13



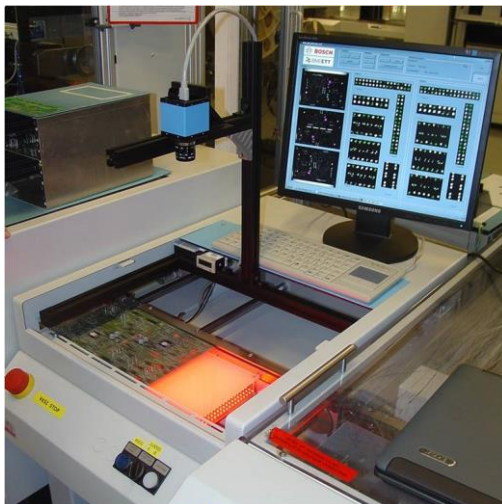
3.6.4 kép – Nyomtatott huzalozású lemez képe hátulról megvilágítva



3.6.5 kép – Az előző kép egy részlete, a beültetett tűskék kitakarják az alsó megvilágítás fényét.

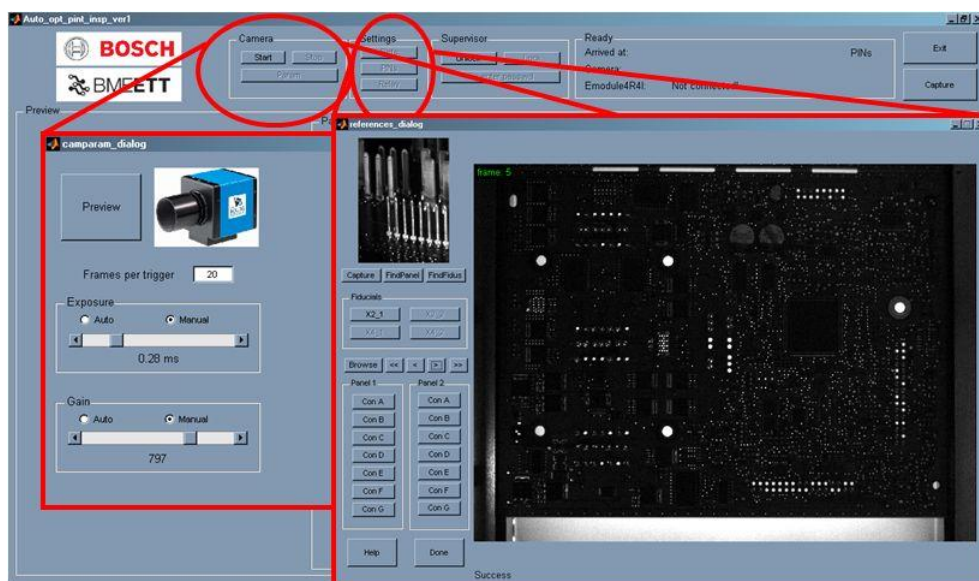
dc_779_13

A 3.6.4 kép, a nyomtatott huzalozású lemez sebességétől függően 15-20 képből álló video filmből (a képváltás periódusa 40 msec) automatikusan leválogatott 3 kép egyike. Három kép segítségével valamennyi beültetési pozíció megtalálható és ellenőrizhető.



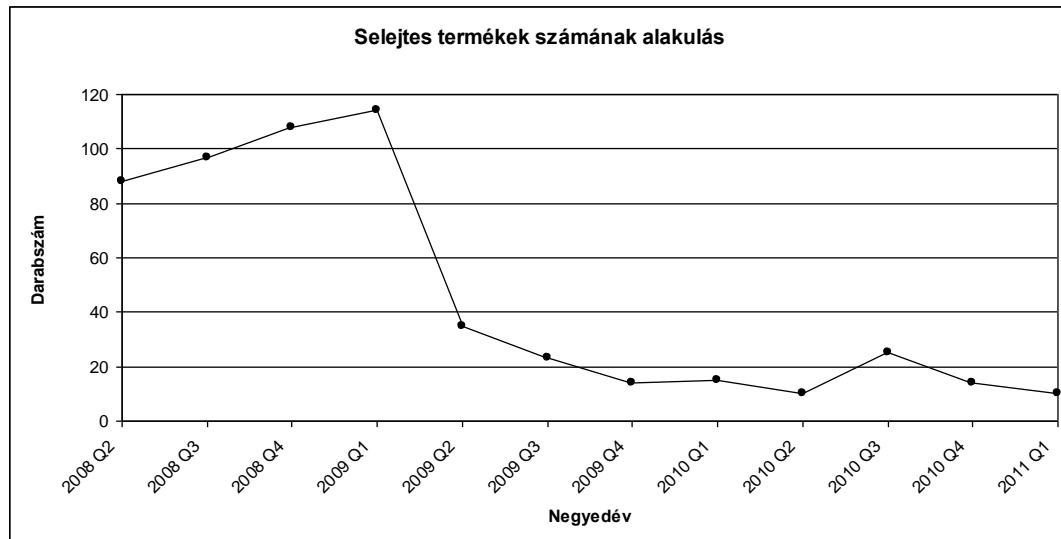
3.6.6 kép – Kísérleti elrendezés PIN vizsgálatra gyártósori nyomtatott huzalozású lemeztovábbító egységre szerelve, kamerával és képképtékelő szoftverrel

A kísérleti berendezés (3.6.6 kép) a környezeti fény kitakarása és a fizikai védelem érdekében ESD védett burkolatot kapott és hónapokon keresztül tesztelésre került. A berendezés kezelői felülete a 3.6.7 képen látható.



3.6.7 kép – A kiértékelő rendszer kezelői felülete

A teszt eredmények a 3.6.8 ábrán jól mutatják a bevezetést követően, 2009 második negyedében az elektromos tesztelésen (in line circuit test – ICT) talált selejtes lemezek számának alakulását. Az elektromos végellenőrzésen a selejtes termékek száma a korábbiaknak a 15-20%-ára csökkent, mivel a beültetés során keletkező hibák azonnali felismerésre, és így gyors javításra kerülhettek.



3.6.8. ábra – Az elektromos tesztelés során felismert hibás nyomtatott huzalozású lemezek száma az új optikai mérési módszer bevezetése előtt és után.

3.6.1.2 Forraszpasztázó vizsgáló berendezés

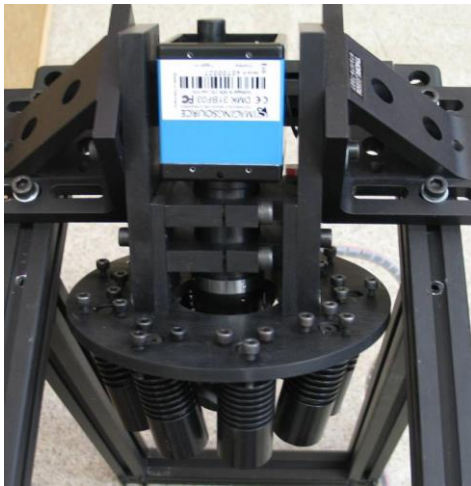
A feladat BGA (Ball Grid Array) alkatrészek beültetéséhez felnyomtatott forraszpasztázó mennyiségének optikai ellenőrzése a kamera mechanikai mozgatása és a gyártósor megállítása nélkül.

A feladatra a 3.6.9 kép szerinti megapixeles CCD kamerát használtuk.



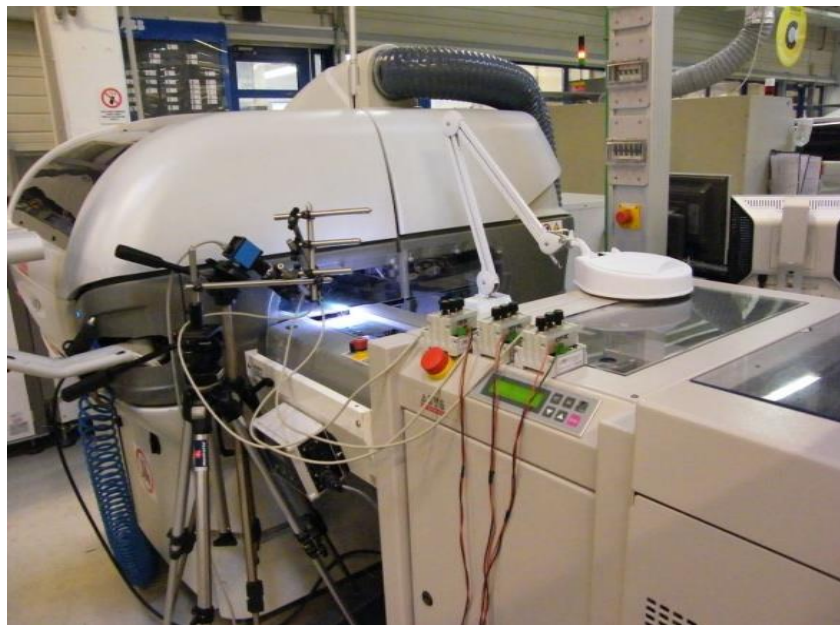
Formátum	1024 x 768 Y800
Sebesség	30, 15, 7.5, 3.75 fps
Érzékelő	ICX204AL, 1/3" Sony CCD
Blende	0.1 ms – 30 s
Erősítés	0 – 36 dB
Offszet	0 – 511
Szaturáció	0 – 200%
Interfész	IEEE 1394
Protokoll	DCAM 1.31

3.6.9. kép - Az alkalmazott digitális kamera



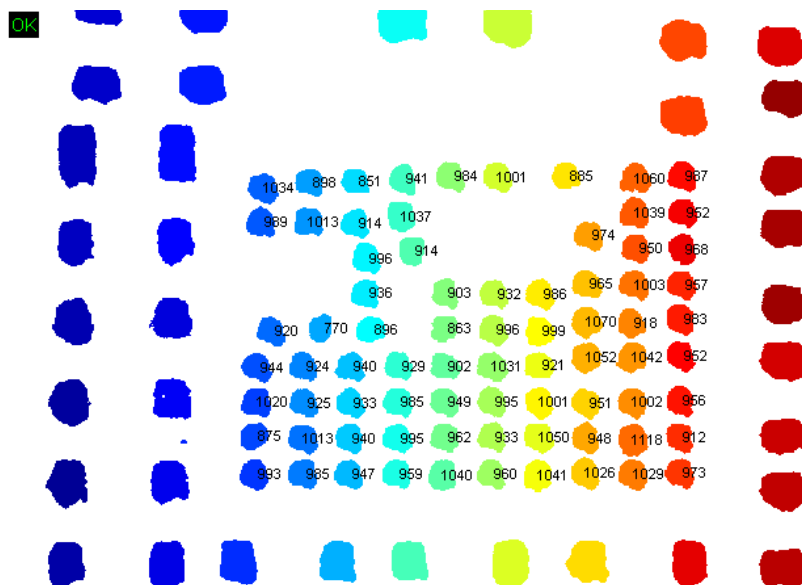
3.6.10 kép - Nagyteljesítményű LED megvilágítás a rövid expozíciós idő érdekében

A követelmények alapvetően eltértek az előző PIN vizsgálóétól. Itt a nyomtatott huzalozású lemeznek egy kisebb területét kellett megfigyelni, ahol a BGA (ball grid array) alkatrészek forraszfelületei találhatók. Ezekre a felületekre felvitt forraszpasztta biztosítja a nagyszámú kontaktust a speciálisan tokozott integrált áramkör és a lemez között. Esetünkben a 10 x 9 db forraszfelület és az IC alján található kontaktus golyók között. A megvilágításra a 3.6.10 kép szerinti 3 x 3 elemű, kör alakú elrendezésű RGB LED sort használjuk, amelynek fénye egy kb. 1 cm átmérőjű körre koncentrálható, így elegendő fényt ad 100 μ sec expozíciós idő mellett is felvétel készítésére.

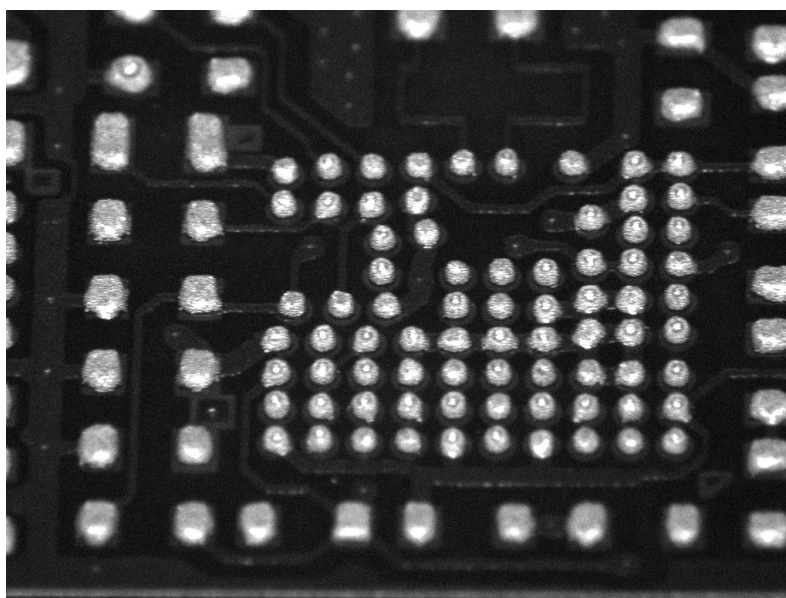


3.6.11 ábra - Rövid expozíciós idejű (0,1 msec), extrém megvilágítási teljesítményű (18 W RGB LED, 10 mm átmérőjű területre koncentrálva) elrendezés pasztanyomtató utáni szállítószalagra szerelve.

A kamerát 45°-os szögben, a nyomtatott huzalozású lemezmozgásra merőlegesen, a 3.6.11 képnek megfelelően helyeztük el. A video felvétel során a lemeznek a vizsgálat szempontjából értékes sávjában, a teljes felületről rögzítünk képet, ezek közül a képek közül automatikusan válogatjuk le és dolgozzuk fel a számunkra érdekes területet, lsd. 3.6.12-13 ábra.



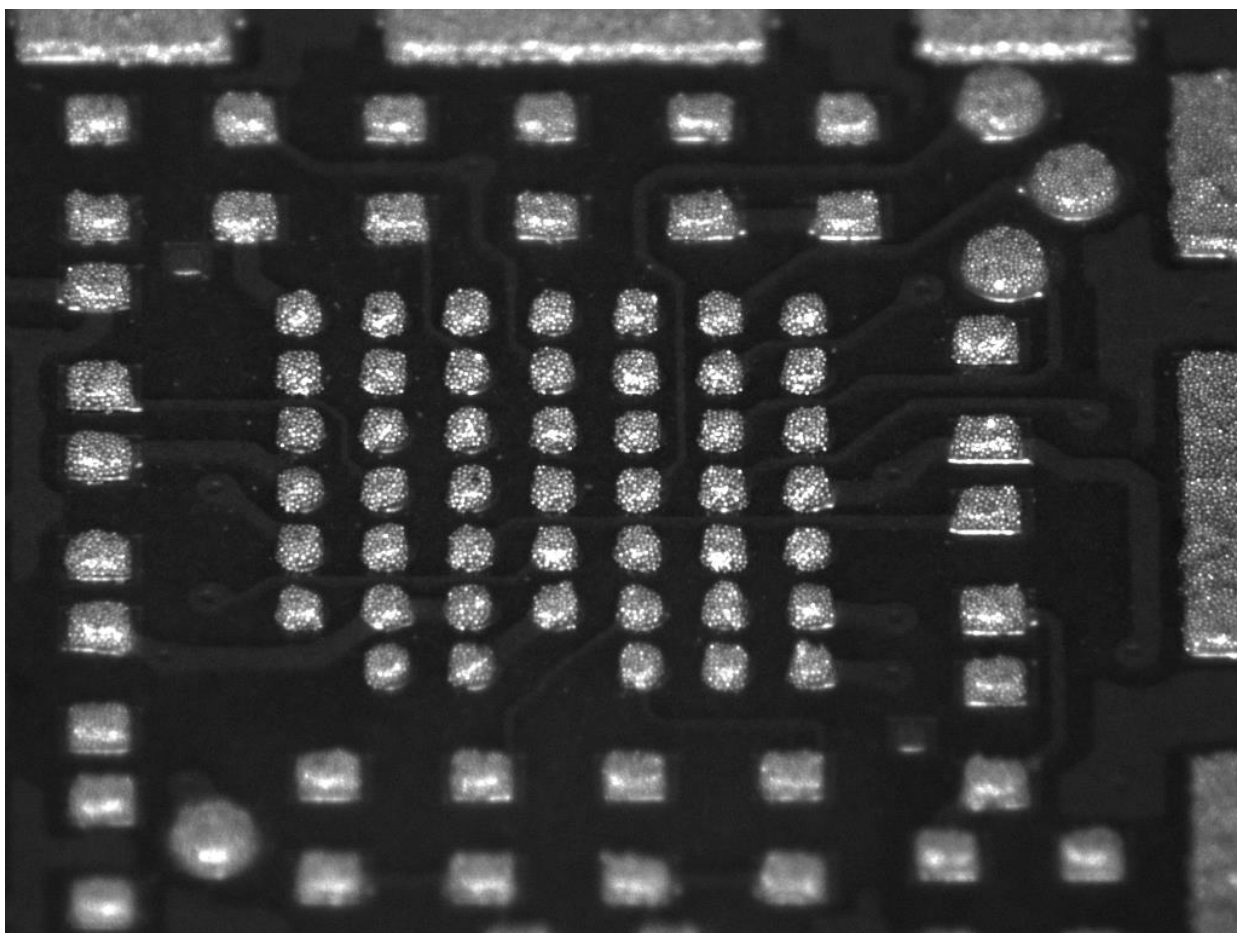
3.6.12 ábra – Leválogatott képrészlet pasztagolyó térfogat becslésekkel



3.6.13 kép - BGA forrasztásához szükséges paszta golyók "kráteresedési" jelenséget mutatva.

A BGA forrasz felületek átmérője $300\text{ }\mu\text{m}$, s távolságuk $500\text{ }\mu\text{m}$. A vízszintes tengely mentén a kép $8,9\text{ mm}$ széles, amiből $8,7\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$ felbontás adódik, függőleges irányban 768 pixel osztozik a 8 mm -es távolságon, amiből $10,4\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$ értéket kapunk.

Ez az optikai felbontás nemcsak a forraszpaszta golyók térfogatának 3.6.10 ábra szerinti becsléséhez, hanem formájának vizsgálatához is elegendő. A 3.6.13 képen egy speciális paszta kráteresedési jelenséget láthatunk, ami a paszta nem megfelelő viszkozitására illetve a berendezés nem megfelelő beállítására (pl. stencilemelkedés sebessége) utalhat. Ilyen felbontással, ilyen finom alakhibákat a hagyományos 3D pasztavizsgáló berendezések nem mutatnak ki. A képeken magába a forraszpasztába ágyazott pici forraszgolyók is megkülönböztethetők (3.6.14 kép), lehetővé téve pl. eloszlásuk mérését, magának a pasztának a minőség ellenőrzését is.



3.6.14 kép – A felvétel felbontása lehetővé teszi a pasztába ágyazott forraszgolyók megkülönböztetését, pl. eloszlásuk meghatározását is

A vizsgálat ideje 4 db nyomtatott huzalozású lemezre, amelyek közvetlenül egymás után érkeznek, kevesebb, mint 1 másodperc .

A kép analízisére [1.16] cikkben adtunk gyors képfeldolgozási algoritmust.

TÉZIS

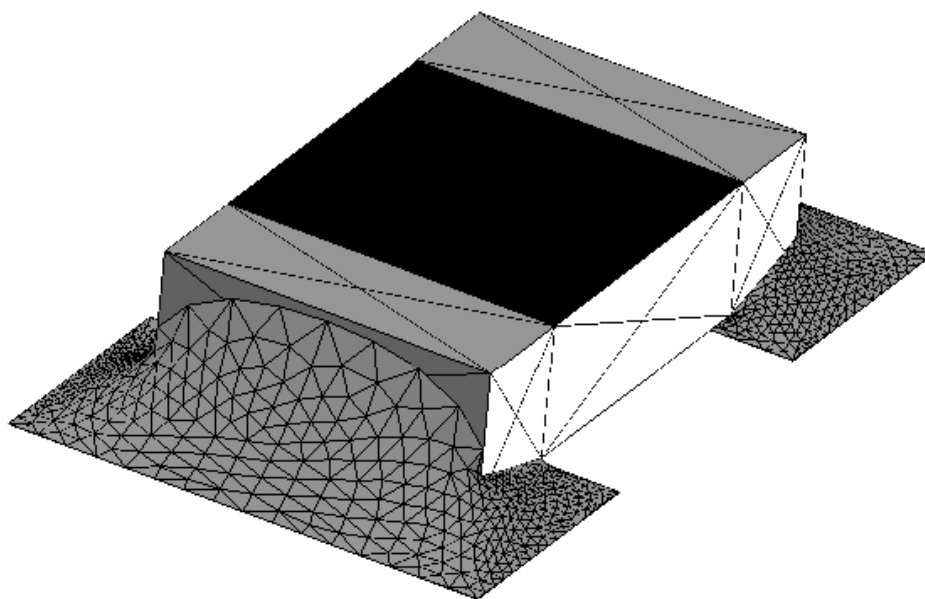
Felismertem, hogy NYHL-nek (nyomtatott huzalozású lemez) az SMT (felületszerelési) folyamatok közötti mozgatása során készített videofelvételeiből az optikai vizsgálatához szükséges képek leválogathatóak és analizálhatóak. Így speciális (kamera vagy NYHL) mozgató rendszert nem tartalmazó vizsgáló automata is készíthető. Közreműködtem ilyen elven működő rendszer megvalósításában, működőképességének igazolásában PIN (csatlakozó tűske) és BGA (ball grid array) forraszpasztta gyors és automatikus vizsgálatára. [1.9]

3.6.2 Automatikus vizsgáló algoritmusok fejlesztése virtuális alkatrész modellek segítségével

Az 1.7.3-5 ábrákon látható megvilágítás és képfelvételi paraméterek meghatározása lényegében szemrevételezéssel történik. A cél a vizsgáló algoritmus szempontjából a legjobb eredmény elérése, pl. a világos és sötét területek arányának minél jellemzőbb, minél hibaérzékenyebb beállítása.

A jelenleg ismert számítógépes grafikai módszerekkel azonban lehetőség van az alkatrészek virtuális modelljének a létrehozására. Ez megfelelő megvilágítás szimulációval kiegészítve, a vizsgáló algoritmus szempontjából optimális beállítási paraméterek szisztematikus meghatározását is lehetővé teheti.

A kiválasztott feladat az 1.7.6 ábra sírkő jelenségének egy nehezebben felismerhető változata volt, ahol az egyik oldalon nem jön létre a kontaktus, de az alkatrész nem egyenesedik fel teljesen, így a hiba merőleges kamerával szinte felismerhetetlen. A kérdés az volt, találunk-e a javasolt módszerrel olyan beállítást, amellyel a hiba megbízhatóan felismerhető.



3.6.15 ábra – Felületszerelt ellenállás virtuális modellje, hibás forrasztás után [3.88]

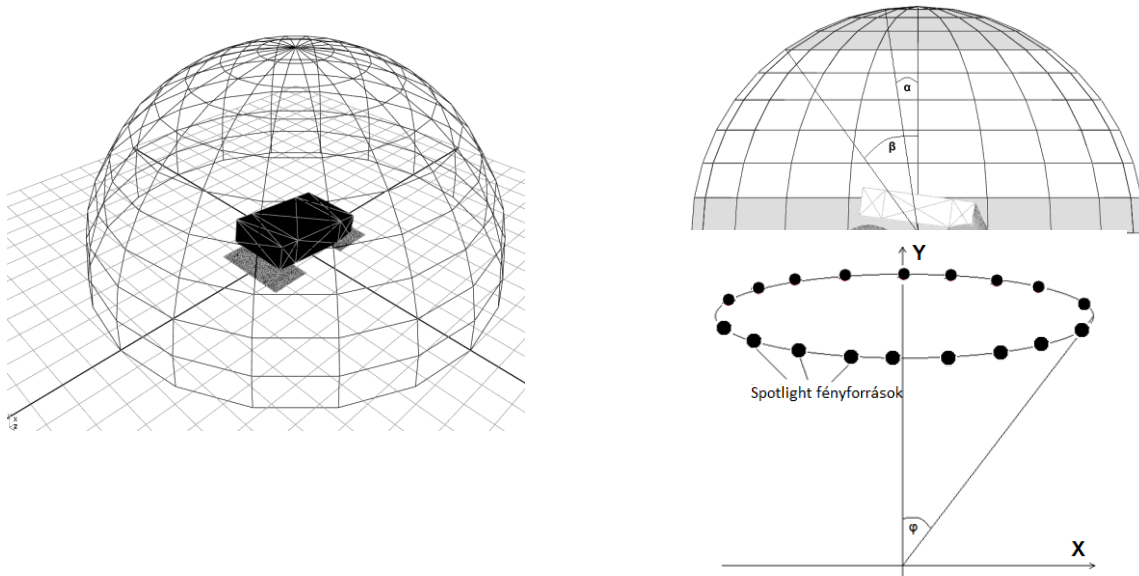
Először az eszköz, illetve a kapcsolódó forrasztás felületek pontos geometriai formájának létrehozására volt szükség, ahol a forrasztás meniszkusz alakok meghatározása a megolvadt forrasztóanyag felületi feszültségének minimalizálásával lehetséges [3.85, 3.86] (3.6.15 ábra).

Ezután az elem, esetünkben az ellenállás, valamint a forrasztóanyag felületi reflexiós tulajdonságainak a beállítása a Cook-Torrence reflexiós modell segítségével történt [3.87].



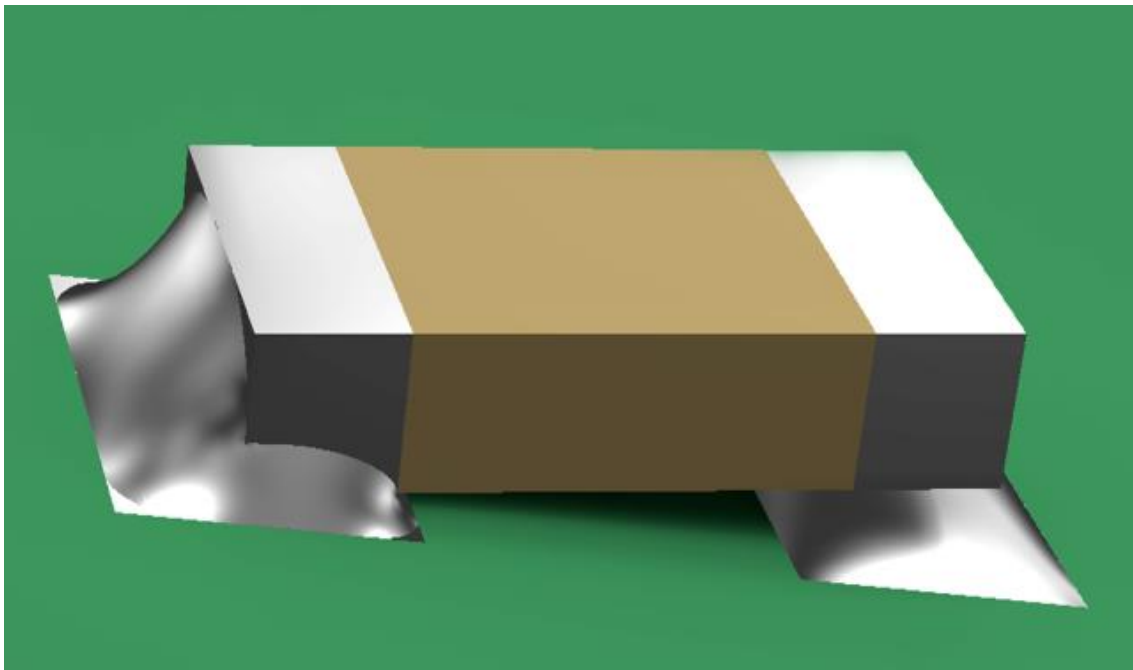
3.6.16 ábra – Phong és Cook-Torrence reflexiós modell

A 3.6.16 ábrán látható, hogy a forrasztófelületekhez hasonló matt fém felületek modellezéséhez a felületi érdesség figyelembevételével ez a modell jól illeszkedik. A megvilágításmódel felépítése a hagyományos AOI rendszerekben alkalmazott alaprendezéseknek, közvetlen és diffúz megvilágításnak megfelelő (3.6.17 ábra).

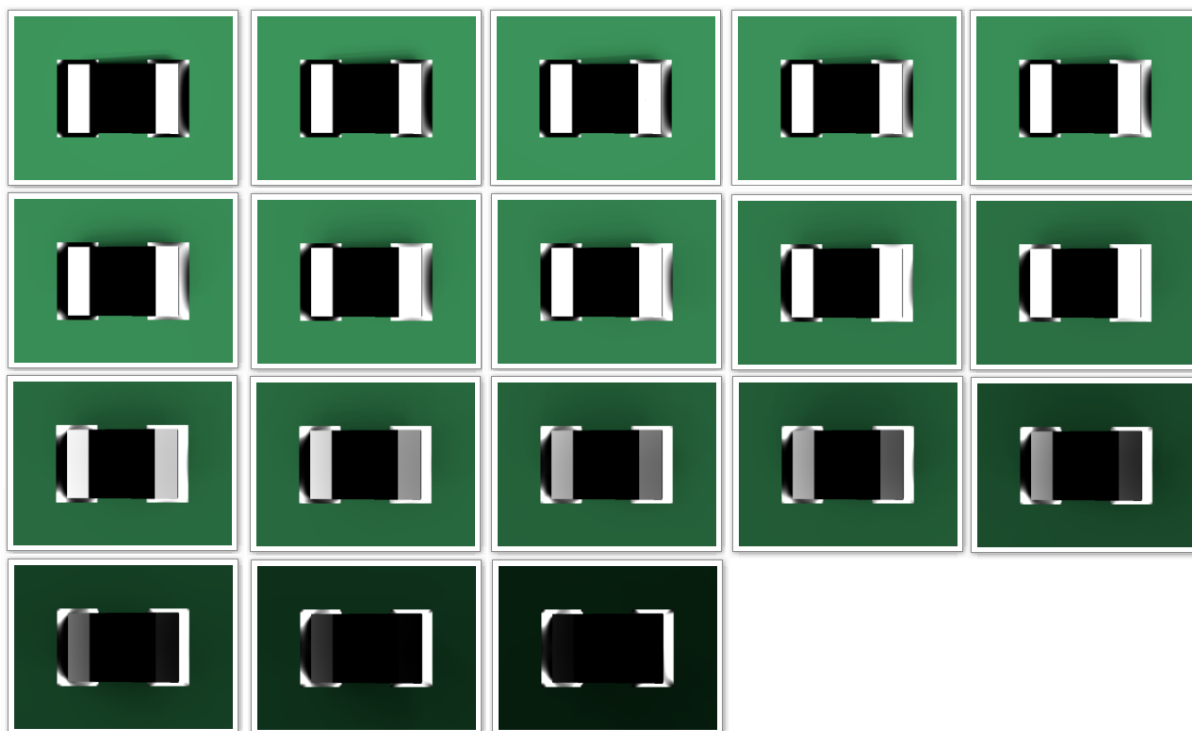


3.6.17 Megvilágítás modellek – diffúz félgömb és közvetlen gyűrű [1.10]

Az elkészült, felületi reflexiókkal ellátott alkatrész modell képe optimális megvilágítás (Isd. később) mellett a 3.18. ábrán látható.



3.6.18 ábra - Kvázi-sírkő effektus virtuális modellje a képanalízis szempontjából optimális megvilágítással



3.6.19 ábra – Különböző megvilágítások hatása az egyes területek világosságára [1.10]

A szisztematikus vizsgálat eredményei különböző megvilágításokkal a 3.6.19. ábrán találhatóak. A vizsgálat szempontjából a legelőnyösebb megoldás, amelyben az ellenállás két végén a forrasztások teljesen különbözőnek látszanak, az egyik például világos, a másik sötét (3.6.18). Az így meghatározott optimális beállítással a vizsgálat megbízhatósága javult. A 3.6.20 ábra szerinti statisztikákból látható, hogy a módszerrel jelentős számú hibás forrasztás átcsúszását sikerült megakadályozni.

		1 hónap optimalizálás előtt		
Vizsgált alkatrészek				
Teljes	Hiba	Valós	Pszedó	Pszedó arány [ppm]
2.423.334	68.205	564	67.641	27.912 ppm
(4.846.664 forrasztás)		Kvazi-tombstone (nyitott kötés)		
		0		
		Számos átcsúszott tombstone		
		1 hónap optimalizálás után		
Vizsgált alkatrészek				
Teljes	Hiba	Valós	Pszedó	Pszedó arány [ppm]
4.655.392	58654	627	58.027	12.560 ppm
(9.310.784 forrasztás)		Kvazi-tombstone (nyitott kötés)		
		62		
		0 átcsúszás		

3.6.20. ábra – Vizsgálati eredmények az új módszer bevezetése előtt és után [3.88]

TÉZIS

Felismertem, hogy automatikus optikai vizsgáló rendszerekben az elektronikai alkatrészek virtuális modelljének létrehozásával az adott vizsgáló algoritmus megbízhatósága a megvilágítás paraméterek automatikus meghatározása útján jelentősen javítható. A módszerrel az általánosan használt vizsgáló algoritmusok átcsúszásarányát sikerült jelentősen csökkenteni. [1.10]

4. Tézisek

4.1. Akusztó-optikai Q-kapcsoló

Bizonyítottam, hogy a TeO_2 kölcsönhatási közegű, nagyhatásfokú akusztó-optikai Q-kapcsolók és módus csatolók a 2-3 μm infravörös hullámhossz tartományban működő lézerezonátorokban alkalmazhatók. Ebben a hullámhossz sávban a sugárzást a víz már elnyeli, ezért ezek a lézerek bőrgyógyászati beavatkozásokra előnyösek.

Az akusztó-optikai eszközök diffrakciós hatásfoka az optikai hullámhossz négyzetével fordítottan arányos, vagyis a növekvő hullámhosszak felé erősen csökken. Hosszabb hullámhosszokon a TeO_2 kölcsönhatási közeg a rezonátor Q kapcsolásához illetve mode-locking-jához elegendő diffrakciós hatásfokot teljesít, ezért hiányt pótol a 2-3 μm hullámhossz tartományban működő lézeralkalmazásokhoz [1.1], [1.2].

4.2. Monoblokk, 2D infravörös akusztó-optikai fényeltérítő

Megmutattam, hogy a két-dimenziós, egycellás diffrakció szögfeltétele anizotróp kristályban a közeli infravörös tartományban is teljesíthető. Igazoltam, hogy az elérhető pásztázási szögtartomány szempontjából a működési frekvenciatartomány pontos megválasztása a meghatározó. Megvalósítottam TeO_2 kölcsönhatási közegű monoblokk 2D fényeltérítőt 1 μm hullámhosszra. Nd:YAG rendszerben teszteltem. Bizonyítottam, hogy $\geq 50 \times 50$ pont felbontás és $\geq 40\%$ maximális hatásfok elérhető [1.3].

4.3. Akusztó-optikai rádiófrekvenciás iránymérő berendezés

Kidolgoztam és megvalósítottam a 30-90 MHz tartományban működő új, akusztó-optikai elvű RF irány- és frekvenciamérő berendezést. Terepmérésekkel végzett kalibrációval igazoltam, hogy merőleges antennasorok felhasználásával a rendszer 360 fok tartományban

2-3 fok pontossággal alkalmas RF hullámok irányának egyértelmű meghatározására [1.4], [1.5].

4.4 „True-time” akusztó-optikai késleltető vonal

Új optikai elrendezést dolgoztam ki RF impulzusok frekvencia független („true-time”), az úthossz-diszperzió elvén alapuló késleltetésére akusztó-optikai Bragg cella alkalmazásával. A rendszer alkalmasságát mérésekkel bizonyítottam. Igazoltam, hogy néhányszor 100 nm fényútkülönbséggel akár 1 μ s időbeli késleltetés érhető el impulzus kiszélesedés nélkül. [1.6]

4.5 DBD (dielectric barrier discharge) fluoreszcens fényforrás

Kidolgoztam új, xenon gázkisülést tartalmazó, higanymentes, belső elektródás DBD (dielectric barrier discharge) elvű fluoreszcens fényforrás konstrukciót [1.7] és közreműködtem annak működést igazoló megvalósításában. A fényforrással ≥ 60 lm/W hatásosság érhető el, bemelegedési jelenségek nélkül [1.8].

4.6 Automatikus optikai vizsgáló berendezés

4.6.1 Felismertem, hogy az SMT (felületszerelési) folyamatok közötti NYHL (nyomtatott huzalozású lemez) mozgatás során készített videofelvételből az optikai vizsgálathoz szükséges képek leválogathatóak és analizálhatóak, vagyis speciális (kamera vagy NYHL) mozgató rendszert nem tartalmazó vizsgáló automata is készíthető. Közreműködtem az ilyen elven működő rendszer megvalósításában, működőképességének igazolásában PIN (csatlakozó tűske) és BGA (ball grid array) forraszpasztta gyors és automatikus vizsgálatára. [1.9]

4.6.2 Felismertem, hogy automatikus optikai vizsgáló rendszerekben az elektronikai alkatrészek virtuális modelljének létrehozásával az adott vizsgáló algoritmus megbízhatósága a megvilágítás paraméterek automatikus meghatározása útján jelentősen javítható. A módszerrel az általánosan használt vizsgáló algoritmusok átcsúszás arányát sikerült csökkenteni [1.10].

5. Az eredmények hasznosulása

4.1 Tézis - Hasonló elven működő akusztó-optikai Q-kapcsolók és módus-csatolók az infravörös tartományban működő impulzus-üzemű lézerekben előnyösek. Ezeknek elsősorban orvosi, bőrgyógyászati alkalmazásaik ismertek.

4.2 Tézis - A kutatómunka folytatásként az eszköz Nd:YAG lézeres alkalmazásának vizsgálata [1.11], valamint a kétdimenziós akusztó-optikai diffrakciós jelenség teljes körű leírása [1.12] terén születtek további eredmények.

4.3 Tézis - A kifejlesztett rendszer a 100 MHz alatti tartományban egyidejű irány és frekvencia meghatározó képességével teljesen egyedülálló. Ez, akárcsak egy korábbi spektrumanalizátor változata alkalmas informatikai szempontból biztonságos, ugráló frekvenciájú (ezért nehezen bemérhető és nem lehallgatható) kommunikációs rendszerek elemeinek tesztelésére.

4.4 Tézis - A kutatás folytatásként, az optikai rendszer részletes elméleti és kísérleti analízise [1.13], továbbfejlesztése elektronikusan vezérelhető úthosszkülönbség, vagyis LCD térbeli fénymodulátor [1.14], valamint elektrooptikai fázismodulátor alkalmazásával [1.15] területeken születtek további eredmények.

4.5 Tézis - A kutatás jelenleg elsősorban UV fényforrás fejlesztés irányában folyik. A meghajtó elektromos jel alakjának megfelelő megválasztásával jelentős fényforráshatásfoknövekedést sikerült elérni [3.83], az eredményekből PhD dolgozat készült [3.84].

4.6 Tézisek - A kutatás eredményei elektronikai gyártó partnerek AOI rendszereiben hasznosultak. A gyors képkéértékelés támogatására új forraszpasztakráteresedés-felismerő algoritmus is kidolgozásra került [1.16], könyvfejezet jelent meg, kiegészítve az ólommentes forrasztáshoz kapcsolódó eredményekkel [1.17] illetve PhD dolgozat [3.88] készült.

Az eredmények továbbá az alábbi kutatási projektekben hasznosultak:

5.1 Ipari megbízás – 4.1 és 4.2 tézis

Siemens - Akusztóoptikai elvű NIR spektrofotométer készülék fejlesztése, 1996-2000, témavezető: Dr. Kocsányi László, [2.24] szabadalom.

5.2 OTKA – 4.4 tézis

1. T 026277 „Vizsgálatok passzív mikrohullámú áramkörök és átviteli rendszerek optoelektronikai megvalósításáról” 1998-2000

2. T 034520 „Optikai módszerek a negyedik generációs mobil hírközlésben” 2001-2004

3. T 032339 „Akusztóoptikai hangolható szűrők paramétereinek optimalizálása” 2000-2003

5.3 EU pályázat – 4.2 tézis

Copernicus Project (Brussels), "Micromachining Application of a New Two-Dimensional Acoustooptic Deflector" Project No: CIPA-CT94-0216, 1995-1997

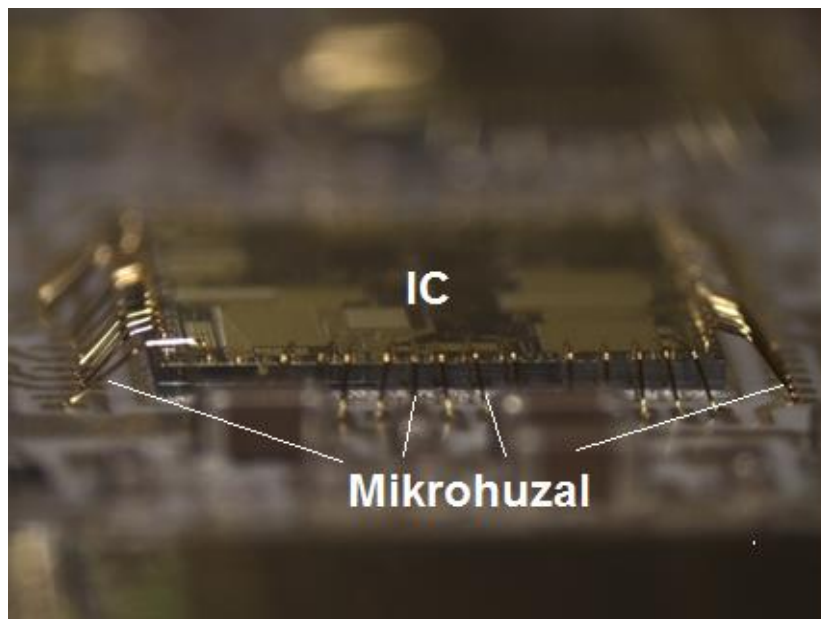
5.4 GVOP – 4.5 tézis

General Electric - Tungsram, Környezetbarát higanymentes fénycső kutatás-fejlesztése, Gazdasági Versenyképesség Operatív Program-3.1.1. 2004-2005

5.5 Ipari megbízások – 4.6 tézisek

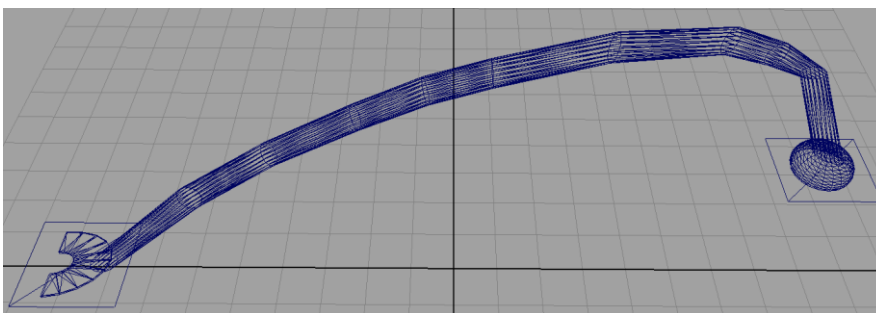
Bosch Autóelektronika Kft.

- *Szerelési és forrasztási hibákat kereső képfeldolgozó rendszerek vizsgáló algoritmusainak kutatása-fejlesztése, 2007-2008*
- *Új, mozgó elemeket - kamera vagy szerelő lemezmozgatást - nem tartalmazó optikai vizsgálati módszer kifejlesztése alkatrészek ellenőrzésére, 2007-2008*
- *Automatikus PIN végellenőrző optikai berendezés hardver és szoftver rendszerének kifejlesztése, 2009-2010*
- *Mikrohuzal kötések optikai vizsgálati módszereinek és a módszerek megbízhatóságának kutatása, 2011 [3.89]*



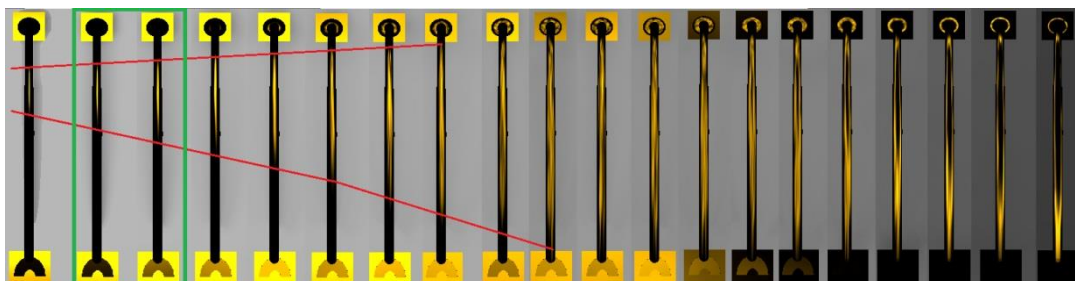
5.1 kép – mikrohuzal kötések vizsgálata automatikus optikai módszerekkel, szálátmérő 15 μm .

A 3.6.2 tézis alkalmazhatóságát vékony aranyhuzal optikai vizsgálati módszerének modellezésén teszteltük. Az 5.2 ábrán a huzal geometriai modellje, formája látható.



5.2 ábra – mikrohuzal geometriai modellje

A felületek reflexiós tulajdonságainak Cook-Torrence modell szerinti definiálását [3.87], és a különböző diffúz megvilágítások létrehozását követően a huzalkötésről egy, különböző megvilágításokkal készült virtuális képsorozat az 5.3 képen látható.



5.3 kép – Diffúz megvilágítás hatásának elemzése 3.6.2 tézis alapján

Az eredmények alapján gyűrű és diffúz megvilágítás esetére is kaptunk megbízható beállítási paraméter sorozatot az AOI vizsgáló algoritmushoz. Vizsgáltuk színes kamera alkalmazásának előnyeit és hátrányait is [3.89].

Nokia Komárom

- *Új, mozgó elemeket nem tartalmazó optikai vizsgálati módszer kutatása és kifejlesztése BGA pasztázás ellenőrzésére, 2007*

Itt kell megemlíteni, hogy jelen értekezésnek nem tárgya az akusztó-optikai elvű impulzus alakformálással kapcsolatos kutatási eredmények összefoglalása [2.32-2.36], de ezek az eredmények is a tézisekben megfogalmazottak hasznosulásának tekinthetők.

6. Köszönetnyilvánítás

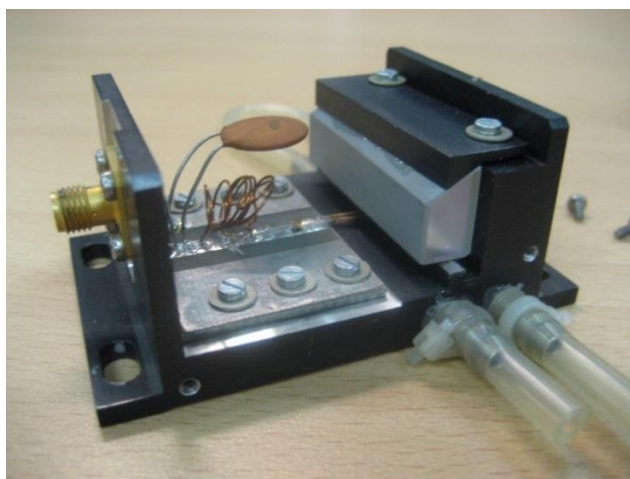
Egy rövid felsorolás azokról, akik nélkül az itt ismertetett eredmények nem jöhettek volna létre:

Szeretném megköszönni támogatását és segítségét korábbi tudományos témavezetőimnek Dr. Giber Jánosnak és Dr. Richter Péternek. PhD hallgatóimnak Dr. Barócsi Attilának, Dr. Maák Pálnak, Dr. Janóczki Mihálynak és Becker Ákosnak. Köszönöm nemzetközi és hazai tudományos és ipari együttműködő partnereink vezetőinek, Szőnyi Istvánnak, Dr. Ráth Tamásnak (MK KFH), Dr. Reich Lajosnak (GE), Szabó Andrásnak (Bosch), Dr. Hans-Joachim Eichlernek (TU-Berlin) és Dr. Jean-Pierre Huignardnak (Thomson) kitartó biztatását és támogatását. Egyetemi és kutató intézeti oldalról jelentős szakmai támogatást kaptam Dr. Földvári István és Dr Péter Ágnes (SZFKI), Dr. Frigyes István (BME VIK, SZHVT), Dr. Reményi Judit (BME TTK AFT) és Dr. Beleznai Szabolcs (BME TTK AFT) részéről.

Köszönettel tartozom a BME Természettudományi Kar, Atomfizika Tanszék, valamint a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikai Technológia Tanszék valamennyi munkatársának, és nem utolsó sorban Dr. Harsányi Gábornak, jelenlegi munkahelyem, az Elektronikai Technológia Tanszék vezetőjének.

7. Műszaki alkotások

7.1 TeO₂ akusztóoptikai Q-kapcsoló infravörös lézeralkalmazásokra (7.1 kép)



7.1 kép

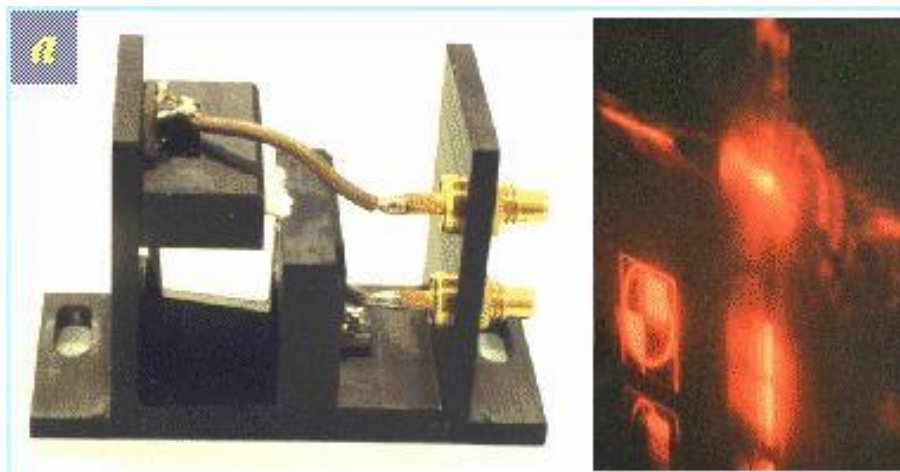
Az alkotásra vonatkozó publikáció [1.2]

- P. Maak, L. Jakab, P. Richter, H. J. Eichler, B. Liu: "Efficient Acousto-Optic Q-Switching of Er:YSGG Lasers at 2.79 μm Wavelength", Applied Optics 39 (18) pp. 3053-3059 (2000), IF: 1,359 Független idéző: 16

Az alkotásra vonatkozó két fontos hivatkozás pontos biográfiai adatai:

- Sorokina IT, Crystalline mid-infrared lasers, TOPICS IN APPLIED PHYSICS, 89: 255-349. (2003)
- Skorczakowski M, Swiderski J, Pichola W, Nyga P, Zajac A, Maciejewska M, Galecki L, Kasprzak J, Gross S, Heinrich A, Bragagna T, Mid-infrared Q-switched Er:YAG laser for medical applications, LASER PHYSICS LETTERS, 7:(7), 498-504. (2010)

7.2 TeO₂ akusztó-optikai kétdimenziós fénytérítő infravörös alkalmazásokra (7.2 kép)



7.2 kép

Az alkotásra vonatkozó publikáció [1.3]

- Barocsi, L. Jakab, I. Verhas, P. Richter, " Two-dimensional acoustooptic light diffraction and its applications ", Journal Integrated Computer Aided Engineering, 3 (2) 108-116, John Wiley & Sons, Inc (1996) Független idéző: 4

Az alkotásra vonatkozó két fontos hivatkozás pontos biográfiai adatai:

- Brzozowski L, Sargent E H, Optical signal processing using nonlinear distributed feedbackstructures, IEEE J QUANTUM ELECT, 36:(5), 550-555. (2000)
- Victor Skorman, Analysis and Characterization of an Acousto-Optic Beam Position Control System: Pentagon final technical report May 2000-May 2001, JUL 2002, Contract Number: F30602-00-1-0582, Report Number: A163804, 2002

7.3 Akusztóoptikai elvű rádiófrekvenciás iránymérő berendezés (7.3 kép)



7.3 kép

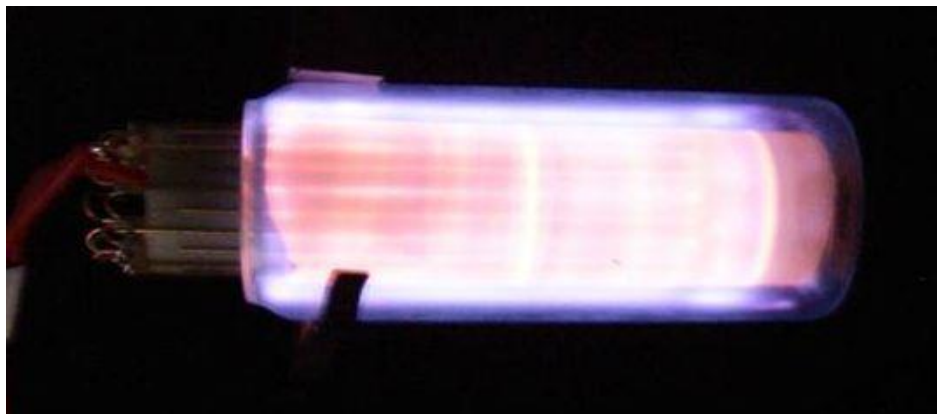
Az alkotásra vonatkozó publikációk [1.4, 1.5]

- L. Jakab, P. Richter, I. Szonyi, "Five channel AO DOA processor for RF applications" Proc. SPIE, Vol. 1704. (1992) pp.153-157, Független idéző: 2
- L. Jakab, A. Barocsi, P. Richter, I. Szonyi, T. Rath, "Test measurement and calibration problems of a direction finding system based on a five channel DOA processor", Proc. SPIE Vol. 2240, (1994) pp. 43-49, Független idéző: 1

Az alkotásra vonatkozó két fontos hivatkozás pontos biográfiai adatai:

- Mieczyslaw Szustakowski, Leon Jodlowski, Idzi Merta, Multifunctional processors of acousto-optic signal processing, Proc. SPIE 2643, Acousto-Optics and Applications II, 2643: 220. (1995)
- Christopher S Anderson, Michael C Zari, Reeder N Ward, Multifunctional receiver using an acousto-optic spectrum analyzer, Proc SPIE, 2754: 2. (1996),

7.4 Higanymmentes fluoreszcens lámpa (7.4 kép)



7.4 kép

Az alkotásra vonatkozó publikációk [1.7, 1.8]

- Reich L, Beleznai Sz, Richter P, Agod A, Jakab L, Dielectric Barrier Discharge Lamp, Benyújtás helye: Egyesült Államok, Megadva: 2008, Lajstromszám: US 7,446,447 B2 , Benyújtás helye: Egyesült Királyság, Megadva: 2009, Lajstromszám: EP 1615258 B1
- Beleznai S, Mihajlik G, Agod A, Maros I, Juhasz, Nemeth Z, Jakab L, Richter P, High-efficiency dielectric barrier Xe discharge lamp: theoretical and experimental investigations, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS, Volume: 39, Issue: 17, Pages: 3777-3787, 2006, IF: 2,077 Független idéző: 30

Az alkotásra vonatkozó két fontos hivatkozás pontos biográfiai adatai:

- Merbahi N, Ledru G, Sewraj N, Marchal F, Electrical behavior and vacuum ultraviolet radiation efficiency of monofilamentary xenon dielectric barrier discharges JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 101: (12) . Paper 123309. (2007)
- Gnybida M, Uhrlandt D, Loffhagen D, „Investigation of a pulsed xenon discharge at medium pressure”, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS 45: (19) . (2012)

8. Irodalom

8.1 A tézispontokhoz kapcsolódó 10 legfontosabb tudományos közlemény

A 4.1 tézishez kapcsolódó publikációk:

[1.1] H. J. Eichler, J. Albertz, F. Below, A. Kummrow, T. Leitter, A. A. Kaminski , L. Jakab, " Acousto-optic mode locking of 3- μ m Er lasers", Applied Optics, Vol. 31, No. 24, 20 August (1992) pp.4909-4911, IF: 1,064, Független idéző: 6

[1.2] P. Maak, L. Jakab, P. Richter, H. J. Eichler, B. Liu: "Efficient Acousto-Optic Q-Switching of Er:YSGG Lasers at 2.79 μ m Wavelength", Applied Optics 39 (18) pp. 3053-3059 (2000), IF: 1,359 Független idéző: 16

A 4.2 tézispontoz kapcsolódó publikáció

[1.3] A. Barocsi, L. Jakab, I. Verhas, P. Richter, " Two-dimensional acoustooptic light diffraction and its applications ", Journal Integrated Computer Aided Engineering, 3 (2) 108-116, John Wiley & Sons, Inc (1996) Független idéző: 4

A 4.3 tézispontoz kapcsolódó publikációk

[1.4] L. Jakab, P. Richter, I. Szonyi, "Five channel AO DOA processor for RF applications" Proc. SPIE, Vol. 1704. (1992) pp.153-157, Független idéző: 2

[1.5] L. Jakab, A. Barocsi, P. Richter, I. Szonyi, T. Rath, "Test measurement and calibration problems of a direction finding system based on a five channel DOA processor", Proc. SPIE Vol. 2240, (1994) pp. 43-49, Független idéző: 1

A 4.4 tézispontoz kapcsolódó publikáció

[1.6] Maak P, Remenyi J, Jakab L, Richter P, Frigyes I, Habermayer S, True time delay line for short pulses based on optical path-length dispersion: experimental proof of functioning, In: 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, Amerikai Egyesült Államok, 2000.05.21-2000.05.25. IEEE, pp. 449-452.(ISBN: 0-7803-6345-0), Független idéző: 2

A 4.5 tézispontoz kapcsolódó publikációk

[1.7] Reich L, Beleznai Sz, Richter P, Agod A, Jakab L, Dielectric Barrier Discharge Lamp, Benyújtás helye: Egyesült Államok, Megadva: 2008, Lajstromszám: US 7,446,447 B2 , Benyújtás helye: Egyesült Királyság, Megadva: 2009, Lajstromszám: EP 1615258 B1

[1.8] Beleznai S, Mihajlik G, Agod A, Maros I, Juhasz, Nemeth Z, Jakab L, Richter P, High-efficiency dielectric barrier Xe discharge lamp: theoretical and experimental investigations, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS Volume: 39 Issue: 17 Pages: 3777-3787, 2006, IF: 2,077 Független idéző: 30

A 4.6.1 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[1.9] Becker A, Jakab L, Optical Examination of Pin Insertion Process, PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING 53:(1-2) pp. 85-89. (2009)

A 4.6.2 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[1.10] M Janóczki, A Borbíró, S Nagy, L Jakab, Illumination Optimization for Quasi-Tombstone Detection, MICRO AND NANOSYSTEMS 2:(3) pp. 149-162. Paper 1876-4029/10. (2010),

8.2. A tézisekhez kapcsolódó egyéb saját publikációk

[1.11] Maák, P., Jakab, L., Richter, P. I., Brignon, A., Huignard, J-P. "Combination of a 2-D Acousto-Optic deflector With Laser Amplifier for Efficient Scanning of a Q-Switched Nd:YAG Laser", Optics Communications, Vol. 176. pp. 163-169 (2000), IF: 1,185, Független idéző: 2

[1.12] Pál Maák, László Jakab, Attila Barócsi, Péter Richter: "Improved Design Method for Acousto-Optic Light Deflectors" Optics Communications Vol. 172, pp. 297-324 (1999)

[1.13] Pál Maák, István Frigyes, László Jakab, István Habermayer, Mihály Gyukics, Péter Richter: "Realization of true-time delay lines based on acoustooptics", IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. 20. No. 4. pp. 730-739 (2002), IF: 1,791 Független idéző: 12

[1.14] Judit Reményi, Pál Maák, István Frigyes, László Jakab, Péter Richter, "Demonstration of continuously variable true-time delay in frequency dependent phase compensating system with acousto-optics and liquid crystal modulator", Optics Communications 226. pp. 211-220 (2003), IF: 1,482 Független idéző: 4

[1.15] Maak P, Gorocs Z, Frigyes I, Jakab L, Richter P, Continuously variable pulse true-time delay system incorporating an acousto-optic, Bragg cell and an electro-optic modulator, OPTICAL ENGINEERING 43:(5) pp. 1238-1243. (2004), IF: 0,952

[1.16] Benedek Cs, Krammer O, Janóczki M, Jakab L, Solder Paste Scooping Detection by Multi-Level Visual Inspection of Printed Circuit Boards, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 60:(6) pp. 2318-2331. (2013), IF*, DOI: 10.1109/TIE.2012.2193859, , IF: 5,160

[1.17] M. Janóczki, Á. Becker, R. Gróf, T. Takács, L. Jakab, Automatic Optical Inspection of Soldering, In: Dr. Yitzhak Mastai (szerk.), Materials Science, InTech Open Access Publisher, 2013. ISBN 980-953-307-918-4

8.3 Az értekezéshez kapcsolódó egyéb saját publikációk

- [2.1] Jakab László, Behringer Tibor, Kocsányi László, „TeO₂ akuszto-optikai modulátorok előállításának technológiai problémái” FINOMMECHANIKA MIKROTECHNIKA 22: pp. 47-50. (1983)
- [2.2] Jakab László, Kocsányi László, Giber János, „TeO₂ akuszto-optikai eszközök sáv szélességének vizsgálata” FINOMMECHANIKA MIKROTECHNIKA 23: pp. 34-35. (1984)
- [2.3] L Jakab, L Kocsanyi, J Giber „Bandwidth limiting factors of the acoustic transducer of TeO₂ acoustooptic devices” In: Proc. Symp. on Electronics Technology. Budapest, Magyarország, (1985). pp. 198-201.
- [2.4] Jakab László, Richter Péter, „Akuszto-optikai jelfeldolgozó eszközök” FINOMMECHANIKA MIKROTECHNIKA 24: pp. 34-38. (1985)
- [2.5] L Jakab, P Richter „Spectrum analyzer with acoustooptic Bragg cell” In: Third Spring School on Acoustooptics and Application. Gdansk, Lengyelország, (1986) pp. 106-110.
- [2.6] L Jakab, P Richter, „Acoustooptic system for fast measurement of coherent light intensity distribution” APPLIED OPTICS (1962-1989) 28:(24) pp. 5233-5236. (1989), IF: 1.405
- [2.7] L Jakab, P Richter, „Fast scanning acoustooptic spectrum analyzer with high dynamic range”, APPLIED OPTICS (1962-1989) 29:(5) pp. 654-657. (1990) IF: 1.107
- [2.8] L Jakab, P Richter, „Scanning acoustooptic spectrum analysers” PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL, ENGINEERING 1296: pp. 276-284. (1990)
- [2.9] L Jakab, P Richter, „Interferometric scanning acoustooptic spectrum analyzer” APPLIED OPTICS (1962-1989) 30:(10) pp. 1206-1209. (1991), IF: 0.930
- [2.10] L Jakab, P Richter, I Szonyi, „Real time RF spectrum analyzer using a five channel acousto-optic Bragg cell” JOURNAL ON COMMUNICATIONS XLII: pp. 9-12. (1991)
- [2.11] Giber, Jakab, Medgyesi, Richter, Várkonyi, „Eljárás és elrendezés anizotóp akuszto-optikai, előnyösen tellúrium-dioxid egykristályok felhasználás szempontjából kitüntetett kristálytani síkjának nagy pontosságú, félpercnél pontosabb orientálására”, Lajstromszám: 196506, Ügyszám: 1584/86, Közzététel éve: 1987
- [2.12] Giber J, Jakab L, Kocsányi L, Márkus L A, Podmaniczky A, Richter P, Várkonyi S, „Nagyfrekvenciás többhullámú ultrahangátalakító és eljárás annak előállítására” Lajstromszám: 194467, Ügyszám: 2634/85, Közzététel éve: 1987
- [2.13] Gerlits, Giber, Jakab, Raksányi, Ráth, Richter, Rothmann, Szabó, Szőnyi, Vági, „Eljárás és berendezés rádiófrekvenciás akuszto-optikai spektrumanalizátorok

frekvenciatartományának kiterjesztésére” Lajstromszám: 198249, Ügyszám: 2567/87, Közzététel éve: 1988

[2.14] Giber, Jakab, Richter, „Eljárás egydimenziós fényintenzitáseloszlás helykoordináták szerinti gyors mérésére és eljárás egydimenziós fényintenzitáseloszlás helykoordináták szerint gyors előállítására, valamint egy-egy készülék azok megvalósítására” Lajstromszám: 204613, Ügyszám: 2219/86, Közzététel éve: 1988

[2.15] Giber, Jakab, Richter, Szabó, Vági, Gerlits, Huszty, Gyenes, Nyári, „Berendezés elektromágneses hullámok frekvenciájának és irányának meghatározására sokcsatornás akusztó-optikai cella és lineáris antennasor alkalmazásával. Lajstromszám: 204136, Ügyszám: 6194/88, Közzététel éve: 1990

[2.16] Giber, Jakab, Richter, Várkonyi, Vági, „Eljárás sokcsatornás, előnyösen fázisérzékeny akusztó-optikai fényeltérítő eszköz kialakítására és az eljárás fogatosításával megvalósított akusztó-optikai fényeltérítő eszköz” Lajstromszám: 205810, Ügyszám: 1579/88, Közzététel éve: 1990

[2.17] A Barocsi, L Jakab, P Richter, Ch Schrödter, Ch Hagedorn, „Investigation of acoustooptic tunable filter parameters for fast spectrometer application” OPTICAL ENGINEERING 32:(10) pp. 2569-2573. (1993)
IF: 0.600

[2.18] L Kocsanyi, L Jakab, J Kenesei, P Richter „A waveguide type acoustooptic deflector with enhanced efficiency”, In: Lasers '92, Proceedings of the International Conference on Lasers and Applications. Houston, Amerikai Egyesült Államok, (1992) pp. 506-511.

[2.19] Kenesei, A Barocsi, L Jakab, „Computative investigation of the planar acoustooptic deflector. PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL, ENGINEERING 1983: pp. 258-259. (1993)

[2.20] L Jakab, P Richter „High speed, high resolution beam scanning and pattern generation”, In: Int. Conf. on Laser '93. San Francisco, Amerikai Egyesült Államok, (1993) pp. 477-479.

[2.21] A Barocsi, L Jakab, P Richter, Efficient, extremely low frequency acousto-optic shifter for optical heterodyning applications” PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING 2240: pp. 108-113. (1994)

[2.22] Barócsi A, Jakab L, Szarvas G, Richter P „Integrált akusztó-optikai fényeltérítő”, In: Csillag L (szerk.) Kvantumelektronika'94: A hazai kvantumelektronikai kutatások eredményei, II. szimpózium. Budapest, Magyarország, (1994) pp. 79-81.

[2.23] L Jakab, G Szarvas, L Kocsanyi, A Barócsi, R Kosza, P Richter, „Realisation experiments of a waveguide type acoustooptic light deflector modul” In: Ivanyi A, Sebestyen I, Honma T

(szerk.) Proceedings of the 3rd Japan-Hungary Joint Seminar on Applied Electromagnetics in Material and Computational Technology. (1994). pp. 309-313.

[2.24] Barócsi Attila, Böröcz Szilárd, Giber János, Jakab László, Kocsányi László, Koppa Pál, Péczeli Imre, Richter Péter, Sólyom András, „Spektrometer”, Lajstromszám: DE10031636 B4, Ügyszám: DE2000131636, Közzététel éve: 2006

[2.25] Jakab László, „Tömbhullámú akusztó-optikai jelfeldolgozó eszközök és alkalmazásaik”, 110 p. 1990. (Kandidátusi értekezés)

[2.26] László Jakab, Péter Richter, Szabolcs Beleznai, „Concept for an efficient mercury-free dielectric barrier discharge lamp”, Technical Report, General Electric Lighting, Compact Fluorescent Technology, 2002, pp 1-69.

[2.27] A Barócsi, I Szőnyi, L Jakab, I Verhás, P Richter, „Optoelectronic signal Processing”, JOURNAL ON COMMUNICATIONS 47: pp. 32-35. (1996)

[2.28] A Barocsi, L Jakab, G Szarvas, P Richter, I Szonyi, „Recent developments and results in acoustooptic signal processing”, PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING 2754: pp. 21-30. (1996), IF: 0.034

[2.29] P Maak, A Barocsi, L Jakab, P Richter „New Acousto-Optic Materials and Light Deflectors for Laser Micromachining Applications”, In: 10th Hungarian-Korean Joint Seminar: Precision machining: Laser Beam Micromachining, (1998) pp. 173-182.

[2.30] Jakab László, Maák Pál, Richter Péter, Barócsi Attila „Nemlineáris optikai eszközök - akusztó-optikai fényeltérítők és alkalmazásuk” 5. Kvantumelektronikai Tavaszi Iskola. Pécs, Magyarország, (1999) pp. 31-41.

[2.31] P Maak, A Barocsi, L Jakab, P Richter, „Recent developments on two-dimensional acousto-optic TeO₂ light deflectors” In: Conference on Advances of Acousto-Optics, AAO'2000. Brugge, Belgium, (2000) pp. 12-15.

[2.32] Seres Enikő, Maák Pál, Jakab László, Osvay Károly, Klebniczki József, Richter Péter „Gyors és programozható femtoszekundumos impulzusalak formálás: fázis és amplitúdó moduláció alkalmazása az akusztó optikában” Kvantumelektronika 2000. Budapest (2000) pp. 12-13.

[2.33] E Seres, K Osvay, P Maak, A Barocsi, L Jakab „Phase Compensation of Femtosecond Laser Pulses by Non-Collinear Acoustooptic” EOS Topical meeting on Diffractive Optics. Budapest, Magyarország, (2001) pp. 86-88.

[2.34] Pal A Maak, Attila Saghy, Attila Barocsi, Laszlo Jakab, Peter Richter „Spectrum synthesis for pulse waveform control by means of acousto-optics” Frontiers in Optics (FiO): Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2003) Tucson, Amerikai Egyesült Államok, (2003) Paper ThZ3.

[2.35] P Maak, A Barocsi, L Jakab, P Richter „Shaping of ultrashort pulses using bulk acousto-optic filter” CLEO/Europe 2005, EQEC 2005: Europhysics Conference Abstracts: Volume 29B. Munich, Németország, 2005.06.12-2005.06.17. p. 12. Paper 29B.

[2.36] Maak P, Kurdi G, Barocsi A, Osvay K, Kovacs AP, Jakab L, Richter P, „Shaping of ultrashort pulses using bulk acousto-optic filter”, APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS 82:(2) pp. 283-287. (2006)
IF: 2.023

8.4 Az értekezéshez kapcsolódó nem saját hivatkozások

[3.1] J. F. Nye, „Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices”, Oxford University Press, 1985

[3.2] P. Debye and F. W. Sears, “On the scattering of light by supersonic waves,” *Proc. Nat. Academy of Science (USA)*, vol. 18, pp. 409-414, June 1932.

[3.3] C. V. Raman and N. S. N. Nath, “The diffraction of light by high frequency sound waves, *Proc. Indian Acad. Sci.*: Pt. 1, vol. 2A, pp. 406-412, 1935; Pt. 11, vol. 2A, pp. 413-420, 1935; Pt. 111, vol. 3 4 pp. 459-465, 1936; also N. S. N. Nath, “Generalized theory, vol. 4.4, pp. 222-242, 1937

[3.4] P. Phariseau, "On the diffraction of light by progressive supersonic waves", *Proc. Indian Acad. Sci.*, vol. 44A, pp.165 -170, 1956

[3.5] W. R. Klein, B. D. Cook, "Unified approach to ultrasonic light diffraction", *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-14, pp. 123 -134, 1967

[3.6] T. M. Smith, A. Korpel, "Measurement of light-sound interaction efficiency in solids", *IEEE J. Quantum Electron. (Corresp.)*, vol. QE-1, pp. 283 -284, 1965

[3.7] E. I. Gordon, "A review of acoustooptical deflection and modulation devices", *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 1391 -1401, 1966

[3.8] V. Chandrasekharan, "The exact equation for Brillouin shifts", *J. Phys. (Paris)*, vol. 26, pp. 655 -658, 1965

[3.9] R. W. Dixon, “Acoustic diffraction of light in anisotropic media,” *IEEE J. Quantum Electron.* QE-3, 85-93, 1967

[3.10] L. L. Hope, "Brillouin scattering in birefringent media", *Phys. Rev.*, vol. 166, pp.883 - 892 , 1968

[3.11] M. S. Kharusi and G. W. Farnell, "Observation of optical activity in Brillouin scattering experiments", *Can. J. Phys.*, vol. 47, pp.2719 -2725, 1969

- [3.12] S. E. Harris and R. W. Wallace, "Acousto-optic tunable filter", J. Opt. Soc. Amer., vol. 59, pp.744 -747, 1969
- [3.13] N. Uchida, "Schaefer-Bergmann diffraction pattern due to the abnormal Bragg reflection in birefringent media", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-7, pp.160 -165 1971
- [3.14] N. Uchida "Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO₂)", Phys. Rev., vol. B4, pp. 3736 -3745, 1971
- [3.15] J. Sapriel, „Acousto-Optics”, John Wiley and Sons, **1979**
- [3.16] N. Uchida and N. Niizeki, "Acoustooptic Deflection Materials and Techniques", Proc. IEEE, vol. 61, pp.1073 -1092, 1973
- [3.17] Y. Ohmachi and N. Uchida, "Acoustic and acousto-optic properties of Pb₂MoO₅ single crystal, *J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 521-524, Feb. 1971.
- [3.18] S. Miyazawa and H. Iwasaki, "Single crystal growth of para-tellurite TeO₂," *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 9, pp. 441-445, May, 1970.
- [3.19] Y. Ohmachi, N. Uchida, and N. Niizeki, "Acoustic wave propagation in TeO₂ single crystal, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 51, pp. 164-168, Jan. 1972.
- [3.20] D. Maydan, "Acoustooptical pulse modulators," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-6, pp. 15-24, Jan. 1970.
- [3.21] S. E. Harris and R. W. Wallace, "Acousto-optic tunable filter." J. Opt. Soc. Amer., vol. 59, pp. 744-747, June 1969.
- [3.22] I. C. Chang, "Noncollinear Acousto-Optic Filter with Large Angular Aperture," Appl. Phys. Lett. 25, 370 (1974)
- [3.23] Podmaniczky A., Tóké Sz., Glazer P., Márkus L. A.: Nagyfrekvenciás, szélessávú ultrahang átalakító és eljárás annak előállítására. (High frequency and broad-band ultrasonic transducer and method for its fabrication.) No.: M-2628 (171-004). Hungarian Patent. Priority date: 20th. Dec., 1974.
- [3.24] Podmaniczky, A. „A simple method for widening the overall bandwidth of acoustooptic light deflectors” Optics Communications, Volume 14, Issue 1, May 1975, Pages 131–133
- [3.25] Podmaniczky, A. „Some properties of TeO₂ light deflectors with small interaction length”, Optics Communications, Volume 16, Issue 1, January 1976, Pages 161–165
- [3.26] Podmaniczky, A.; Tóké (1978), Sz.; Torok, P.: Lézersugaras gyorsnyomtató (in Hungarian). A High-Speed Laser Printer, Automatizálás, Vol. XI. 1978, No. 6., pp. 4-7.

- [3.27] Y. Ohmachi and N. Uchida, "Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO₂ single crystals", J. Appl. Phys., vol. 41, pp.2307 -2311, 1970
- [3.28] Y. Ohmachi, N. Uchida and N. Niizeki, "Acoustic wave propagation in TeO₂ single crystal", J. Acoust. Soc. Amer., vol. 51, pp.164 -168, 1972
- [3.29] N. Uchida, "Acoustic attenuation in TeO₂", J. Appl. Phys. (Commun.), vol. 43, pp.2915 - 2917 1972
- [3.30] Földvári I, Raksányi K, Voszka R, Hartmann E, Péter Á, „The role of impurities in the quality of paratellurite single crystals” JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH 52:(PART 2) pp. 561-565. (1981)
- [3.31] Silvestrova I M, Pisarevskii Y V, Foldvari I, Peter A, Voszka R, Janszky J, „REFINEMENT OF SOME OPTICAL AND ACOUSTIC PARAMETERS OF PARATELLURITE” PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLIED RESEARCH 66: pp. K55-K58. (1981)
- [3.32] Földvári I, Polgár K, Voszka R, Balasanyan R, „A simple method to determine the real composition of LiNbO₃ crystals” CRYSTAL RESEARCH AND TECHNOLOGY 19:(12) pp. 1659-1661. (1984)
- [3.33] Földvári I, Polgár K, Mecseki A, „Nonstoichiometry as a source of intrinsic impurities in LiNbO₃ crystals” ACTA PHYSICA HUNGARICA 55:(1-4) pp. 321-327. (1984)
- [3.34] A. H. Meitzler, E. K. Sittig, "Characterization of piezoelectric transducers used in ultrasonic devices operating above 0.1 GHz", J. Appl. Phys., vol. 40, pp.4341 -4352, 1969
- [3.35] T. M. Reeder; D. K. Winslow; „Characteristics of microwave acoustic transducers for volume wave excitation”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 17, issue 11, pp. 927-941, 1969
- [3.36] E. K. Sittig, "Effects of bonding and electrode layers on the transmission parameters of piezoelectric transducers used in ultrasonic digital delay lines", IEEE Trans. Sonics Ultrason., vol. SU-16, pp.2 -10, 1969
- [3.37] A. W. Warner, D. L. White and W. A. Bonner, "Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite", J. Appl. Phys., vol. 43, pp.4489 -4495 1972
- [3.38] N. J. Berg, J. N. Lee, Acoustooptic Signal Processing, (Dekker, New York, 1983).
- [3.39] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill, New York, 1968).
- [3.40] A. Korpel and R. L. Whitman, "Visualization of a Coherent Light Field by Heterodyning with a Scanning Laser Beam," Appl. Opt. 8, 1577-1580 (1969).
- [3.41] R. L. Whitman and A. Korpel, "Probing of Acoustic Surface Perturbations by Coherent Light," Appl. Opt. 8, 1567-1576, (1969).

- [3.42] 5. D. Casasent and D. Psalkis, "Classification for Optical Signal Processing Architectures," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 214, 32-00 (1979)
- [3.43] R. A. Coppock, R. F. Croce, „Wideband Optical Channelizer For Simultaneous Frequency And Direction Finding”, Proc. SPIE 0214, Acousto-Optic Bulk Wave Devices, 124 (April 17, 1980);
- [3.44] N. A. Riza and N. Madamopoulos, “Microwave band demonstration of a reective geometry fiber and free-space binary photonic delay line,” IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 7, pp. 103–105, Apr. 1997
- [3.45] A. Molony, L. Zhang, J. A. R. Williams, I. Bennion, C. Edge, and J. Fells, “Fiber Bragg-grating true time-delay systems: Discrete-grating array 3-b delay lines and chirped-grating 6-b delay lines,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1527–1530, Aug. 1997
- [3.46] M. Y. Frankel, P. J. Matthews, and R. D. Esman, “Fiber-optic true time steering of an ultrawide-band receive array,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1522–1526, Aug. 1997
- [3.47] R. A. Minasian and K. E. Alameh, “Optical-fiber grating-based beamforming network for microwave phased arrays,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1513–1518, Aug. 1997
- [3.48] M. Y. Frankel, P. J. Matthews, and R. D. Esman, “Two-dimensional fiber-optic control of a true time-steered array transmitter,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 44, pp. 2696–2702, Dec. 1996
- [3.49] D. T. K. Tong and M. C. W. Multiwavelength, “Optically controlled phased-array antennas,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, pp. 108–205, Jan. 1998
- [3.50] R. A. Minasian and K. E. Alameh, “Ultimate beam capacity limit of fiber grating based true-time-delay beam-formers for phased arrays,” in IEEE 1998 Int. Microwave Symp., June 1998, TH2C-4, pp. 1375–1378.
- [3.51] E. N. Toughlian and H. Zmuda, “A photonic variable RF delay line for phased array antennas,” J. Lightwave Technol., vol. 8, pp. 1824–1828, Dec. 1990.
- [3.52] I. Frigyes, A. J. Seeds: “Optically generated true-time delay in phased-array antennas” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 43, (1995) 2378–2386
- [3.53] I. Frigyes and G. Szporni, “Optically generated true time delay via pathlength dispersion,” in IEEE Top. Meet. OMI, Les Vaux, France, Nov. 21–23, 1994, Ma5, pp. 82–85.
- [3.54] I. Frigyes, O. Schwelb, and J. Bércecs, “Investigations and improvements in microwave opto-electronic variable delay lines,” in IEEE 1996 Int. Microwave Symp., vol. 2, San Francisco, CA, June 1996, WE3F-20, pp. 887–890.

[3.55] C. F. Schönbein, "On the Odour Accompanying Electricity and on the Probability of its Dependence on the Presence of a New Substance," *Philos. Mag. (III)*, 1840, 17, 293-4. Also: *München Abhandl.*, 1837-43, 587; also: "Beobachtungen über den bei der Elektrolyse des Wassers und dem Ausströmen der gewöhnlichen Elektrizität aus Spitzen sich entwickelnden Geruch," *Ann. Phys. Chem.*, 1840, 50, 616-635.

[3.56] W. Siemens, "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendraht," *Ann. Phys. Chem.*, 1857, 102, p 66.

[3.57] Vollkommer F., L. Hitzschke, „Durchbruch bei der effizienten Erzeugung von Excimer-Strahlung“, *Phys. Blätter*, 53, No. 9, 887 (1997)

[3.58] B. Eliasson, U. Kogelschatz, „UV excimer radiation from dielectric-barrier discharges“, *Applied Physics B*, August 1988, Volume 46, Issue 4, pp 299-303

[3.59] Ulrich Kogelschatz, Baldur Eliasson, Walter Egli, „From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges“, *Pure and Applied Chemistry* 01/1999; 71(10):1819-1828.

[3.60] Y. TANAKA, "Continuous Emission Spectra of Rare Gases in the Vacuum Ultraviolet Region," *J. Opt. Soc. Am.* 45, 710-713 (1955)

[3.61] Hitzschke L and Vollkommer F 2001 *Proc. 9th Int. Symp. Science and Technology of Light Sources (LS-9)* (Cornell University, Ithaca, NY, USA, 12–16 August 2001) ed. R S Bergman vol 134 (Ithaca, NY: Cornell University Press) pp 411–422

[3.62] Masafumi Jinno, Hisayoshi Kurokawa and Masaharu Aono, „Fundamental research on mercuryless rare gas fluorescent lamps at pulsed discharge“, *Industry Applications Conference*, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting, vol.3 IEEE, pp. 2151 - 2157

[3.63] Matthew T. Holzmam: "Automatic Optical Inspection Of Circuit Assemblies In a High Mix/Low Volume Environment", *SMTA International Conference Proceedings*, Christopher Associates, Inc. Santa Ana, 09/26/2004, California USA,

[3.64] Miran Burmen, Franjo Pernuš and Boštjan Likar: "LED Light Sources: A Survey of Quality-Affecting Factors and Methods for Their Assessment", *Measurement and Science Technology* Vol. 19, No. 12, 2008, pp. 15

[3.65] Sheng-Lin Lu, Xian-Min Zhang, Yong-Cong Kuang: "Optimized Design of an AOI Illuminator", *Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, Beijing, China, 2-4 Nov. 2007, pp. 924-928

[3.66] Yuji Takagi, Seiji Hata, Susumu Hibi: "Visual Inspection Machine for Solder Joints Using Tiered Illumination", *SPIE Machine Vision Systems Integration in Industry*, Vol. 1386, 1990, pp. 21-29

- [3.67] Y.J. Roh, D.Y. Lee, M.Y.Kim, H. S. Cho: "A Visual Inspection System with Flexible Illumination and Auto-focusing", Proceedings of SPIE, Vol. 4902, 2002, pp. 463-475
- [3.68] Alexander Hornberg: "Handbook of Machine Vision", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2006
- [3.69] E.R.Davies: "Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities", Elsevier, 2005
- [3.70] Kjell J. Gasvik: "Optical Metrology 3rd Edition", John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 0-470-84300-4, 2002
- [3.71] J. Frauchiger, W. Lüthy, „Interaction of 3 μ m radiation with matter", Optical and Quantum Electronics, July 1987, Volume 19, Issue 4, pp 231-236
- [3.72] F. Auzel, S. Hubert and D. Meichenin, „Multifrequency room-temperature continuous diode and Ar* laser-pumped Er³⁺ + laser emission between 2.66 and 2.85 μ m", Appl. Phys. Lett. 54, 681 (1989)
- [3.73] J. Breguet, A. F. Umyskov, W. A. R. Luthy, I. A. Shcherbakov, H. P. Weber, "Electrooptically Q-switched 2.79 mm YSGG:Cr:Er laser with intracavity polarizer," IEEE J. Quantum Electron. 27, 274–276 (1991)
- [3.74] Dizier, F.; Ayral, J.-L.; Montel, J.; Huignard, J.-P., „a Phase Conjugate Nd:YAG Laser with Beam Steering", Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials, Volume 2, Issue 02, pp. 229-245 (1993).
- [3.75] Lee JP. „Interferometric acoustooptic signal processor for simultaneous direction finding and spectrum analysis." Appl Opt. 1983 Mar 15; 22 (6):867.
- [3.76] D. T. K. Tong and M. C. W. Multiwavelength, "Optically controlled phased-array antennas," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, pp. 108–205, Jan. 1998.
- [3.77] R.J. Carman and R.P. Mildren, "Computer modelling of a short-pulse excited dielectric barrier discharge Xenon excimer lamp ($\lambda \sim 172$ nm)" J. Phys. D: Applied Physics, vol. 36, pp19-33, (2003)
- [3.78] Eric Verhelst, Tom Ocket, „Lead-Free Manufacturing Effects on Press-Fit Connections", 21st International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Zurich, Switzerland, September 9 2002, Session 7, Chapter 07.05
- [3.79] Chou G J S, Hilty R D, „ Toward Lead-Free Compliant Connections" The Surface Mount Technology Association (SMTA) International Conference, September 25, 2005, pp. 104-119.
- [3.80] Chiu, S-N; Perng, M-H. „Reflection-area-based feature description for solder joint inspection.", Machine Vision and Applications, 2007, 18, 95-106

- [3.81] Lu, S-L; Zhang, X-M; Kuang Y-C. „Optimized Design of an AOI Illuminator”, Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing, China, Nov 2-4, 2007.
- [3.82] N. Uchida and H. Iwasaki, "Two-dimensional acoustooptical deflector", Japan. J. Appl. Phys. (Lett.), vol. 8, pp.811 1969
- [3.83] Beleznai S, Mihajlik G, Maros I, Balazs L, Richter P, Improving the efficiency of a fluorescent Xe dielectric barrier light source using short pulse excitation, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS 41:(11) Paper 115202. (2008)
- [3.84] Szabolcs Beleznai, „Development of mercury free dielectric barrier discharge light sources”, PhD dolgozat, BME Fizika Doktori Iskola, 2009
- [3.85] Racz, M.; Szekely, J.; Brakke, K. A., „ A General Statement of the Method of Calculation for Problem and Description Some Meniscus Problems of a Proposed in Materials Processing. ISIJ International, 1993, Vol. 33., 328-335.
- [3.86] Racz, M.; Szekely, J., „Determination of Equilibrium Droplets in the Assembly of Shapes Surface and Optimal Volume of Solder Mounted Integrated Circuits”, ISIJ International, 1993, Vol. 33., 336-342.
- [3.87] Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance: A reflectance model for computer graphics; Computer Graphics, Volume 15, Number 3, August 1981
- [3.88] Janóczy Mihály, Új röntgenes és optikai hibadetektáló elektronikai gyártástámogatási technológiák, PhD dolgozat (2012), BME VIK, Villamosmérnöki Tudományok Doktori Iskola
- [3.89] Dr. Harsányi Gábor, Dr. Jakab László, Dr. Illés Balázs, Janóczy Mihály, Becker Ákos, „Mikrohuzal kötések optikai vizsgálati módszereinek és a módszerek megbízhatóságának kutatása” – Kutatási jelentés, Robert Bosch Elektronika Kft., 2011. november 30.
- [3.90] Max Born, Emil Wolf, „Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light”, Cambridge University Press, 1999
- [3.91] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, „Fundamentals of Photonics”, Wiley, 2013